

# 现代电子设备设计制造手册

周 旭 编著

電子工業出版社·

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 提 要

本书涉及整个电子设备的生产过程,根据现行标准和众多设计经验的体会,为解决当今微电子设计领域日益增加的密度问题提供了指导、准则和大量的数据及图示,以现代电子设备可靠性设计、制造技术为主题,首先侧重介绍了电子设备内部和外部环境防护设计的基本原理及相关技术,如电子设备热设计、防腐蚀设计、隔振缓冲设计、电磁兼容设计和整机结构设计等,并以信息设备和电力设备为例,进行详细阐述;然后详细介绍了长三角地区先进的现代电子设备制造技术,尤其是印制电路板设计制造、微电子工艺、设备组装和调试等工艺设计技术知识。

读者对象:本书是企业总工程师的必备知识手册,也十分适合广大从事电气、电子和机电类设备的设计、生产制造的技术人员和技术管理人员参考学习。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代电子设备设计制造手册/周旭编著. —北京:电子工业出版社, 2008.10

ISBN 978-7-121-07410-3

I. 现… II. 周… III. ①电子设备—设计—技术手册②电子设备—制造—技术手册 IV. TN05-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 145149 号

策划编辑:刘海艳

责任编辑:沈德雨

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:53.5 字数:1488.6 千字

印 次:2008 年 10 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:118.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010) 88258888。

# 前 言

如今的中国已成为世界电子设备制造中心。中国整个电子设备制造业的结构正在发生新的变化与调整，由上海、苏南、浙北所构成的长江三角洲已经成为中国电子设备制造业热点之最，全球每 10 台计算机中，就有 1.5 台的主板在此生产；全世界每 10 部手机中就有 3 部液晶显示屏在此制造；全球每 2 只鼠标中就有 1 只由此提供……长三角地区拥有世界先进的电子设备设计制造技术，IT 产业成为这里的主导产业。同样，全国各地的电子信息产业也都在迅猛发展，新器件、新材料、新工艺不断问世，特别是日新月异的微电子技术正在向各个领域广泛渗透。在这样的大背景之下，传统的电子设备结构设计和工艺方法受到严峻挑战，中国电子设备制造业迫切需要大量精通各方面知识的设计、制造工程师。

现代电子设备所处的环境主要包括气候环境、机械环境、电磁环境、生物化学环境和核辐射环境等。各种环境因素的影响可能导致电子设备性能降低、失效甚至损坏，必须采取防护措施。本书前半部分以电子设备防护性设计为主线，结合作者多年外企从业经验和国内多次讲学体会，详细介绍了电子设备的可靠性设计技术、热防护设计技术、腐蚀防护设计技术、隔振缓冲设计技术和电磁兼容性设计技术，并以信息设备和电力设备为例详细阐述。

本书后半部分详细介绍了电子设备整机设计制造技术，内容包括电子设备造型设计、整机结构设计、印制电路板组件设计制造技术、微电子工艺、电子设备加工和调试技术等，有力地保证了全书的系统性和完整性。相信本书体现了“一个好的设计师首先是一个好的工艺师”的思想理念。

书中内容尽量避免深奥的理论阐述和公式推导，充分体现了“实用性”这一写作宗旨。本书是环境电磁学、电子与电气工程、无线电和通信工程、信息和计算机技术、仪器和测试技术、机械设计、工业自动化技术、机电一体化技术以及系统可靠性工程等领域专业人员的必备知识手册。

本书主要供电子设备相关企业设计、生产、管理人员参考使用。书中引用了一些前人的成果，在此表示衷心感谢。同时书中错漏、欠妥之处在所难免，竭诚欢迎广大读者批评指正。

周旭 于南通大学  
Zhou.x@ntu.edu.cn

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	(1)
1.1 电子设备基础知识 .....	(1)
1.1.1 电子设备的分类和特点 .....	(1)
1.1.2 环境对电子设备的要求 .....	(2)
1.2 电子设备设计制造基础 .....	(6)
1.2.1 概述 .....	(6)
1.2.2 电子设备结构设计基础 .....	(10)
1.2.3 电子设备制造材料基础 .....	(13)
1.2.4 电子设备制造工艺基础 .....	(37)
第 2 章 电子设备可靠性设计 .....	(49)
2.1 电子设备可靠性基础 .....	(49)
2.1.1 电子设备可靠性的内涵 .....	(49)
2.1.2 电子元器件及其可靠性 .....	(52)
2.1.3 电子设备的系统可靠性 .....	(97)
2.2 可靠性设计方法和措施 .....	(97)
2.2.1 可靠性设计方法 .....	(97)
2.2.2 可靠性设计措施 .....	(106)
第 3 章 电子设备热设计 .....	(116)
3.1 电子设备热设计基础 .....	(116)
3.1.1 电子设备热环境和散热途径 .....	(116)
3.1.2 电子设备热设计原则和步骤 .....	(119)
3.2 电子设备的通风冷却 .....	(122)
3.2.1 电子设备的自然风冷 .....	(122)
3.2.2 电子设备的强迫风冷 .....	(128)
3.3 电子设备的液体冷却 .....	(133)
3.3.1 液体冷却的类型 .....	(134)
3.3.2 液体冷却的设备 .....	(136)
3.4 热电制冷与热管散热技术 .....	(138)
3.4.1 热电制冷技术 .....	(138)
3.4.2 热管散热技术 .....	(140)
第 4 章 电子设备防腐蚀设计 .....	(144)
4.1 电子设备防腐蚀基础 .....	(144)
4.1.1 腐蚀效应及环境因素 .....	(144)
4.1.2 材料耐蚀性及防腐要求 .....	(146)
4.2 潮湿和盐雾的防护 .....	(149)
4.2.1 潮湿的侵蚀及防护 .....	(149)



4.2.2	盐雾的侵蚀及防护 .....	(154)
4.3	金属腐蚀及其防护 .....	(155)
4.3.1	金属腐蚀的机理 .....	(155)
4.3.2	金属防蚀的方法 .....	(168)
4.4	生物腐蚀及其防护 .....	(186)
4.4.1	霉菌腐蚀基础 .....	(186)
4.4.2	霉菌的防护 .....	(188)
4.5	材料老化及其防护 .....	(190)
4.5.1	材料老化基础 .....	(190)
4.5.2	高分子材料的防老化 .....	(192)
第 5 章	电子设备隔振缓冲技术 .....	(194)
5.1	电子设备的机械环境 .....	(194)
5.1.1	概述 .....	(194)
5.1.2	单自由度系统的振动 .....	(196)
5.1.3	多自由度系统的振动 .....	(198)
5.2	振动和冲击的防护 .....	(200)
5.2.1	防护原理和措施 .....	(201)
5.2.2	减振器设计 .....	(206)
5.2.3	隔振缓冲系统的设计 .....	(210)
第 6 章	电子设备电磁干扰基础 .....	(216)
6.1	概述 .....	(216)
6.1.1	电磁场基础 .....	(216)
6.1.2	电磁发射基础 .....	(219)
6.1.3	电磁干扰基本术语 .....	(228)
6.2	电磁干扰源 .....	(234)
6.2.1	电磁干扰源的类型和性质 .....	(234)
6.2.2	各种干扰源产生机理 .....	(242)
6.2.3	电磁干扰源的危害 .....	(253)
6.3	电磁干扰的传播 .....	(264)
6.3.1	电磁干扰的三要素 .....	(264)
6.3.2	电磁干扰的传输途径 .....	(266)
第 7 章	电子设备干扰防护基础 .....	(271)
7.1	概述 .....	(271)
7.1.1	电子设备干扰防护历程 .....	(271)
7.1.2	电子设备干扰防护的内涵 .....	(273)
7.1.3	电子设备防干扰相关机构 .....	(281)
7.2	电磁干扰控制技术 .....	(285)
7.2.1	电磁干扰控制策略 .....	(285)
7.2.2	静电干扰控制技术 .....	(288)
7.2.3	电源干扰控制技术 .....	(312)

7.2.4	电缆线防干扰技术 .....	(315)
7.2.5	电路干扰控制技术 .....	(323)
<b>第 8 章</b>	<b>屏蔽与滤波技术 .....</b>	<b>(336)</b>
8.1	屏蔽防护设计 .....	(336)
8.1.1	屏蔽类型及屏蔽效果 .....	(336)
8.1.2	电场屏蔽 .....	(337)
8.1.3	磁场屏蔽 .....	(343)
8.1.4	电磁场屏蔽 .....	(351)
8.1.5	屏蔽材料的开发和应用 .....	(365)
8.2	滤波防护设计 .....	(381)
8.2.1	概述 .....	(381)
8.2.2	馈通滤波器 .....	(384)
8.2.3	电源线滤波器 .....	(386)
8.2.4	信号线滤波器 .....	(391)
<b>第 9 章</b>	<b>接地与搭接技术 .....</b>	<b>(397)</b>
9.1	接地技术 .....	(397)
9.1.1	安全接地 .....	(398)
9.1.2	信号接地 .....	(402)
9.1.3	特殊电子设备的接地 .....	(413)
9.2	搭接技术 .....	(416)
9.2.1	搭接的概念与分类 .....	(416)
9.2.2	搭接设计和加工 .....	(419)
<b>第 10 章</b>	<b>信息及电力设备防护技术 .....</b>	<b>(425)</b>
10.1	信息电子设备防护技术 .....	(425)
10.1.1	电子战与信息设备防护 .....	(425)
10.1.2	信息设备防电磁泄漏 .....	(433)
10.1.3	信息电子设备的雷电防护 .....	(435)
10.1.4	计算机干扰防护设计 .....	(448)
10.1.5	移动通信设备防干扰 .....	(467)
10.2	电力电子设备防护技术 .....	(475)
10.2.1	晶闸管应用设计 .....	(476)
10.2.2	整流变压器与交流柜设计 .....	(481)
<b>第 11 章</b>	<b>电子设备防干扰管理和认证 .....</b>	<b>(485)</b>
11.1	电子设备防干扰预测和管理 .....	(485)
11.1.1	电子设备防干扰预测技术 .....	(485)
11.1.2	电子设备防干扰管理的内容 .....	(495)
11.2	电子设备防干扰标准与认证 .....	(497)
11.2.1	电子设备防干扰标准 .....	(497)
11.2.2	电子设备防干扰认证 .....	(513)
<b>第 12 章</b>	<b>电子设备整机结构设计 .....</b>	<b>(524)</b>

12.1	电子设备造型设计 .....	(524)
12.1.1	电子设备造型设计基础 .....	(524)
12.1.2	电子设备的形态设计 .....	(529)
12.1.3	电子设备的色彩设计 .....	(531)
12.2	整机机械结构设计 .....	(534)
12.2.1	概述 .....	(534)
12.2.2	组件结构设计 .....	(551)
<b>第 13 章</b>	<b>印制基板设计制造技术 .....</b>	<b>(563)</b>
13.1	印制电路板设计技术 .....	(563)
13.1.1	概述 .....	(563)
13.1.2	印制电路板上的元器件 .....	(573)
13.1.3	印制电路板上的导线 .....	(581)
13.1.4	印制电路板的对外连接 .....	(592)
13.2	印制基板的制造与检验 .....	(593)
13.2.1	刚性印制板的制造及检验技术 .....	(593)
13.2.2	挠性印制板制造及检测技术 .....	(606)
<b>第 14 章</b>	<b>印制电路板组装焊接技术 .....</b>	<b>(613)</b>
14.1	电子组装工艺技术概述 .....	(613)
14.1.1	电子组装的内容和方法 .....	(613)
14.1.2	电子组装工艺技术的发展 .....	(615)
14.2	电子焊接工艺技术基础 .....	(618)
14.2.1	用于焊接的材料 .....	(618)
14.2.2	焊接机理和方法 .....	(629)
14.2.3	通用手工焊接技术 .....	(631)
14.2.4	焊点的质量及检查 .....	(640)
14.3	印制板插装焊接技术 .....	(643)
14.3.1	元器件的安装 .....	(644)
14.3.2	印制电路板手工焊接技术 .....	(647)
14.3.3	印制板自动焊接技术 .....	(650)
14.4	印制板表面安装技术 .....	(657)
14.4.1	概述 .....	(657)
14.4.2	印制板表面安装工艺 .....	(681)
<b>第 15 章</b>	<b>电镀及塑料加工技术 .....</b>	<b>(688)</b>
15.1	电子设备电镀工艺技术 .....	(688)
15.1.1	概述 .....	(688)
15.1.2	金属镀前表面处理技术 .....	(693)
15.1.3	电子设备常用电镀工艺 .....	(698)
15.2	塑料加工工艺技术 .....	(706)
15.2.1	塑料成型工艺 .....	(706)
15.2.2	其他塑料工艺 .....	(721)

第 16 章 电子设备整机装配技术 .....	(725)
16.1 整机通用装配技术 .....	(725)
16.1.1 概述 .....	(725)
16.1.2 整机联装接线技术 .....	(735)
16.2 输配电开关柜装配技术 .....	(746)
16.2.1 一次母线设计与制造 .....	(746)
16.2.2 开关柜二次回路接线 .....	(756)
第 17 章 电子设备调试与检验 .....	(765)
17.1 电子设备调试检验基础 .....	(765)
17.1.1 调试内容和步骤 .....	(765)
17.1.2 调试仪器及其使用 .....	(770)
17.2 电子设备调试检验技术 .....	(774)
17.2.1 电气调试的一般方法 .....	(774)
17.2.2 电子设备振动冲击试验 .....	(788)
17.2.3 电子设备电磁兼容试验 .....	(791)
17.3 电子设备调试检验实例 .....	(826)
17.3.1 高压开关柜的整机检验与调试 .....	(826)
17.3.2 低压开关柜的整机检验 .....	(831)
17.3.3 控制屏(台)的出厂检查试验 .....	(836)
附录 A 电子设备防干扰技术相关缩写 .....	(840)
附录 B 场强的估算 .....	(843)
参考文献 .....	(846)

# 第1章 绪 论

## 1.1 电子设备基础知识

当前，人们把利用电子学原理制成的设备、装置、仪器、仪表等统称为电子设备。例如，通信设备、电视机、电子计算机、电子测量仪器等，正广泛应用于人类生活的各个领域。

电子设备的设计制造技术与电子技术的发展密切相关。新材料的使用、新器件的出现，尤其是大规模和超大规模集成电路的推广应用，以及微电子工艺的不断革新，使电子设备在电路和结构上都产生了巨大的飞跃。

### 1.1.1 电子设备的分类和特点

#### 1.1.1.1 电子设备的分类方法

电子设备由于产生、变换、传输和接收的电磁信号的不同，一般分为模拟设备和数字设备。此外还有多种分类方法。

##### 1. 电子设备按功能及用途分类

- (1) 广播、通信系统 广播、电视设备、各种有线及无线通信设备等。
- (2) 信息处理系统 各种类型的电子计算机及其外围设备、控制设备等。
- (3) 电子应用系统 各种电子检测设备、雷达设备、医用电子设备、激光应用设备等。

##### 2. 电子设备防触电保护分类

(1) 0类设备 0类设备是指仅靠基本绝缘作为防触电保护的设备。当设备有能触及的可导电部分时，该部分不与设施固定布线中的保护（接地）线相连接，一旦基本绝缘失效，则其安全性完全取决于使用环境。

(2) I类设备 I类设备是指设备的防触电保护不仅靠基本绝缘，还包括一种附加的安全措施，即将能触及的可导电部分与设施固定布线中的保护（接地）线相连接。

(3) II类设备 II类设备是指设备的防触电保护不仅靠基本绝缘还具备像双重绝缘或加强绝缘这样的附加安全措施。这种设备不采用保护接地的措施，也不依赖于安装条件。II类设备可以具有保持保护接地回路连续性的器件，但其必须在设备内部、按II类设备的要求与能触及的可导电表面绝缘起来。有金属外壳的II类设备必要时可以采取将等电位连接线与外壳连接。

(4) III类设备 III类设备是指设备的防触电保护依靠安全特低电压（SELV）供电，且设备内可能出现的电压不会高于安全特低电压。III类设备不得具有保护接地手段。必要时，可因工作（与保护目的不同）的原因，采取与大地连接的手段，但必须在技术上无损于安全水平。有金属外壳的III类设备必要时可以采取将等电位连接线与外壳连接的手段。

## 3. 欧盟 WEEE（报废电子、电气设备）指令管辖的电子电气设备分类（见表 1-1）

表 1-1 WEEE 指令管辖的电子电气设备分类表

序 号	产 品 类 别	产 品 名 称
1	大型家用电器	大型制冷器具、冰箱、冷冻箱、其他用于食品制冷、保鲜和储存的大型器具；洗衣机、干衣机、洗碗机、电饭锅、电炉灶、电热板、微波炉、其他用于食品烹饪和加工的大型器具；电加热器、电暖气、其他用于加热房间、床和座椅的大型器具；电风扇、空调器具、其他吹风、换气通风和空调设备
2	小型家用电器	真空吸尘器、地毯清扫机、其他清洁器具；用于缝纫、编织及其他织物加工的器具；熨斗和衣服熨烫、压平和其他衣物护理器具；烤面包机、电煎锅；研磨机、咖啡机和开启或密封容器或包装的设备；电刀、剪发、吹发、刷牙、剃须、按摩和其他身体护理器具；电钟、电子表和其他测量、显示或记录时间的设备；电子秤
3	信息和通信设备	中央数据处理器、个人计算机、打印机、复印设备、电气电子打字机、台式和袖珍计算器、利用电子方式对信息进行采集、储存、处理、显示或传输的其他产品和服务；用户终端和系统；传真机；电报机；电话；收费电话；无绳电话；移动电话；应答系统；通过电信传输声音、图像或其他信息的产品或设备
4	消费类产品	收音机、电视机、录像机；录音机；高保真录音机；功放机；音乐仪器；其他记录或复制声音或图像的产品或设备
5	照明设备	荧光灯具（家用的照明设备除外）；直型荧光灯；紧凑型荧光灯；高亮度放电灯，包括压力钠灯和金属卤素灯；低压钠灯；其他用于传播或控制光的照明设备（细丝灯泡除外）
6	电气电子工具	电钻；电锯；缝纫机；对木材、金属或其他材料进行车削、铣、沙磨、研磨、锯削、切割、剪切、钻孔、冲孔、折叠、弯曲或类似加工的设备；用于打铆钉、钉子或螺钉或用于去除铆钉、钉子或螺钉的工具；用于焊接或类似用途的工具；对于液体或气体进行喷射、传播、分散或其他处理的设备；用于割草或其他园艺操作的工具
7	玩具、休闲和运动设备	电动火车或赛车；手持电子游戏机；电子游戏机；用于骑自行车、潜水、跑步、划船等的测算装置；带有电子或电气元件的运动设备；投币机
8	医用设备	放射治疗设备；心脏用设备；透视装置；肺呼吸机；核医疗设备；玻璃容器内诊断用实验室设备；分析仪；冷冻机；生殖试验设备；其他用于探索、预防、监控、处理、缓解疾病、伤痛的设备
9	监测和控制仪器	烟雾探测器；发热调节器；温控器；家用或实验室设备用测量、称重或调节器具；工业安装（如在控制板上）中所用的其他监控仪器
10	自动售卖机	热饮料自动售卖机；瓶装或罐装热或冷饮料自动售卖机；固体产品自动售卖机；钱票自动售卖机；所有自动送出各类产品的器具

## 1.1.1.2 电子设备的一般特点

（1）集成度高 电子设备具有“轻、薄、短、小”的特点，它在知识、技术和信息的密集程度等方面均高于其他产品。知识和技术的密集导致物化劳动的密集，因而产品的附加值也高，可以获得较高的经济效益。

（2）使用广泛 目前电子设备已广泛应用于国防、科技、国民经济各个部门以及人民生活的各个领域，所处的工作环境十分复杂，往往要在恶劣的条件下工作。

（3）可靠性要求高 对军用及航天电子设备而言，可靠性要求非常高，否则会带来不可弥补的损失。例如，航天电子设备，在十分复杂的组成中，若某一个元器件或连触点发生故障，就会影响整台设备的正常工作，甚至会导致导弹、运载火箭和卫星的飞行失控。

（4）精度要求高，控制系统复杂 例如，卫星通信地面站，要求直径 30m 的抛物面天线自动跟踪人造卫星不发生偏差；还要求在一年之内电源不中断，遇到故障能自动换接备用电源等。

## 1.1.2 环境对电子设备的要求

电子设备所处的环境大体上可分为自然环境、工业环境和特殊使用环境。除自然环境之外，工业环境和特殊使用环境一般是可人为制造和改变的，故这类环境有时也称为诱发环境。

环境因素造成的设备故障是严重的。国外曾对机载电子设备进行故障剖析，结果发现，50% 以上的故障是由环境因素所致；而温度、振动、湿度三项环境造成的故障率则高达 44%。

环境因素造成的设备故障和失效可分为两类:

(1) 功能故障 指设备的各种功能出现不利的变化,如受环境条件的影响,其功能不能正常发挥。但一旦外界因素消失,功能仍能恢复。

(2) 永久性损坏 如机械损坏等。

电子设备除了在满足技术性能要求能正常而可靠地工作外,在设计和制造电子设备时还应满足以下基本要求。

### 1.1.2.1 工作环境对电子设备的要求

电子设备所处的工作环境多种多样。气候条件、机械作用力和电磁干扰,是影响电子设备的主要因素。

#### 1. 气候环境对电子设备的要求

气候环境对设备的影响主要表现在使电气性能下降、温升过高、运动部位不灵活、结构损坏,直至不能正常工作。为了减少和防止这些不良影响,电子设备必须做到:

(1) 采取散热措施,限制设备工作时的温升,并能够耐受高、低温循环时的冷、热冲击。

(2) 采取各种防护措施,防止潮湿、盐雾、空气污染等气候因素对电子设备内元器件及零部件的侵蚀和危害,延长其寿命。

#### 2. 机械环境对电子设备的要求

机械环境,是指电子设备被运载或使用时,所受到的振动、冲击、离心加速度等机械作用。它对设备的影响主要是:元器件损坏、失效或电参数改变;结构件断裂或变形过大;金属件疲劳、破坏等。为了防止机械作用对设备产生不良影响,必须采取减振缓冲措施,确保电子设备内电子元器件和机械零部件,在受到外界强烈振动和冲击的情况下,不致变形和损坏,保证其工作的可靠性。

#### 3. 电磁环境对电子设备的要求

电子设备工作的周围空间,充满了由于各种原因所产生的电磁波。外部及内部电磁干扰有可能使设备或系统的工作性能偏离预期的指标,即工作性能发生了“降级”;甚至还可能使设备或系统失灵,或导致寿命缩短,或使系统效能发生非预期的永久性下降,严重时还能摧毁设备或系统。

为了保证设备在电磁干扰的环境中能正常工作,要求采取各种措施,提高设备的电磁兼容能力。

### 1.1.2.2 使用环境对电子设备的要求

#### 1. 对设备体积、重量的要求

##### (1) 三种主要因素

① 设备用途因素。对于军用电子设备,减小其体积、重量就直接影响着部队的战斗力和设备使用的灵活性,同时对减少战士体力消耗,提高战斗力有着重要的战术意义。如野战部队背负式通信机,其宽度不应超过人的双肩宽度(平均约为400mm),高度为背负时不能碰到臀部(平均约为500mm),其重量不超过18kg。又如人造卫星使用的电子设备,其体积、重量有极严格的要求,任何一部分体积增大,就意味着减少其他设备的体积。此外,卫星的重量和发射火箭的起飞重量有严格的比例。卫星的重量每增加1kg,火箭的燃料就多耗费数吨。

② 运载工具因素。各种运载工具如汽车、坦克、飞机、舰船等,由于安装各种设备的空间有限和操纵控制的需要,对电子设备的体积重量有较严格的要求。一般来说,航空设备的要求最高,其次是各种车辆,再次是各种舰船。飞机座舱容积有限,所用的各种电子设备,往往都将分

机或部件的体积重量尽可能做得很小, 仅把设备的控制和指示部分安装在飞行员的座舱内, 其他部分则安装在飞机的各个部位, 各部分之间用电缆连接。汽车、坦克用电子设备的体积要求和空用相似, 重量要求则可放宽。

电子设备工作时, 为了减少冲击、碰撞、振动和加速度的破坏作用, 减少其体积、重量, 会收到良好的效果。因为当重量减少时其质量也将减小, 如果施加的加速度一定, 则对设备的破坏力就会减小。

③ 经济成本因素。为了节省原材料和降低生产费用, 应力求使电子设备的体积小、重量轻。

#### (2) 表征设备体积、重量的指标

① 平均密度(重量体积比)。设备的总重量与总体积之比, 称为设备的平均密度。设备的平均密度对结构设计有直接影响。当平均密度为  $0.5\text{kg}/\text{dm}^3$  时, 结构设计不会遇到很大困难; 当平均密度为  $1.5\sim 1.7\text{kg}/\text{dm}^3$  时, 结构设计需要精心安排; 当平均密度为  $2\sim 2.2\text{kg}/\text{dm}^3$  时, 结构设计需要应用特殊材料(如高强度轻金属合金)、高稳定元器件和采用新工艺、新结构; 当平均密度达到  $2.5\text{kg}/\text{dm}^3$  时, 结构设计将很困难。

② 体积填充系数。设备内全部零部件的体积总和与机箱(柜)内部容积的比值。

设备的平均密度和体积填充系数, 标志着设备紧凑性的程度。平均密度越高, 体积填充系数越大, 则设备的紧凑性越高。

#### (3) 高紧凑性产生的矛盾

现代电子设备都希望有较高的紧凑性, 但追求紧凑性会产生一系列矛盾, 这主要表现在以下几方面:

① 设备温升限制。这是绝大多数设备(尤其是大功率设备)提高紧凑性时遇到的最大困难。若设备的平均密度增大, 则单位体积发热量增加。为了保证设备正常工作, 就需要采用一套冷却系统, 而冷却系统本身具有一定的体积和重量, 这样反而提高了设备的总体积和总重量。

② 分布参数限制。随着紧凑性提高, 元器件间距变小, 这会导致设备电磁兼容性能下降, 尤其是超高频和高压设备, 由于分布电容增大, 容易产生自激和脉冲波形变坏。由于元器件之间距离小, 还容易产生短路和击穿。

③ 装配和维修困难。平均密度和体积填充系数增大, 给生产时的装配和使用时的维护、修理带来一定困难, 降低了设备的可靠性。

④ 产品成本增加。紧凑性高的设备, 在整机结构方面要求有较高的零件加工精度和装配精度, 因而提高了产品成本。

### 2. 操纵和维护人员对设备的要求

#### (1) 操纵人员对电子设备的要求

- ① 为操纵者创造良好的工作条件。
- ② 设备操作简单, 操纵者能很快进入工作状态, 不需要很熟练的操作技术。
- ③ 设备安全可靠, 有保险装置。当操纵者发生误操作时, 不会损坏设备, 更不能危及人身安全。
- ④ 控制机构轻便, 尽可能减少操纵者的体力消耗。读数指示系统清晰、便于观察, 且长时间观察不易疲劳, 也不损伤视力。

#### (2) 维护人员对电子设备的要求

① 在发生故障时, 便于打开维修或能迅速更换备用件。例如, 采用插入式和折叠式结构、快速装拆结构, 以及可换部件式结构等。

② 可调元件、测试点应布置在设备的同一面; 经常更换的元器件应布置在易于装拆的部位;



对于电路单元应尽可能采用印制板并用插座与系统连接。

③ 元器件的组装密度不宜过大，即体积填充系统在可能的条件下应取低一些（一般最好不超过 0.3），以保证元器件间有足够的空间，便于装拆和维修。

④ 设备应具有过负荷保护装置（如过电流、过电压保护），危险和高压处应有警告标志和自动安全保护装置等，以确保维修安全。

⑤ 设备最好具备监测装置和故障预报装置，能使操纵者尽早地发现故障或预测失效元器件，及时更换维修，以缩短维修时间，并防止大故障出现。

### 1.1.2.3 制造环境对电子设备的要求

#### 1. 生产条件对电子设备的要求

生产厂的设备情况、技术和工艺水平、生产能力和生产周期，以及生产管理水平等因素都属于生产条件。

生产条件对产品的要求，一般有以下几个方面：

（1）设备中的零件、部件、元器件，其品种和规格应尽可能地少，尽量使用由专业厂生产的通用零件、部件或产品。因为这样便于生产管理，有利于提高产品质量，并降低成本。

（2）设备中的机械零、部件必须具有较好的结构工艺性，能够采用先进的工艺方法和流程，使得原材料消耗低、加工工时短。例如零件的结构、尺寸和形状便于实现工序自动化；以无屑加工代替切削加工，即提高冲制件、压塑件的数量和比例等。

（3）设备中的零、部件和元器件及其各种技术参数、形状、尺寸等，应最大限度地标准化和规格化。还应尽可能采用生产厂以前曾经生产过的零、部件，充分利用生产厂的先进经验，使产品具有兼容性。

（4）设备所使用的原材料，其品种、规格越少越好，应尽可能少用或不用贵重材料，立足于使用国产材料和来源多、价格低的材料。

（5）设备（含零、部件）的加工精度要与技术条件要求相适应，不允许无根据地追求高精度。在满足产品性能指标的前提下，其精度等级应尽可能低，装配也应简易化，尽量不搞选配和修配，力求减少装配工人的体力消耗，同时也便于自动流水线生产。

#### 2. 经济性对电子设备的要求

电子设备的经济性有两方面的内容，即使用经济性和生产经济性。使用经济性包括设备在使用、储存和运输过程中所消耗的费用，其中维护费所占的比例最大，电源费用次之。

生产经济性是指生产成本，包括生产准备费用、原材料和辅助材料费用、工资和附加费用、管理费用等。

为了提高产品的经济性，在设计阶段就应充分考虑以下几个方面。

（1）研究产品与部件技术条件，分析产品设计参数，正确制订设计方案。

（2）根据产量确定产品结构形式和生产类型。产量的大小决定着生产批量的规模，生产批量不同，其生产方式类型也不同，因而其生产经济性也不同。

（3）运用价值工程观念，在保证产品性能的条件下，按最经济的生产方法设计零、部件；在满足产品技术要求的条件下，选用最经济、合理的原材料和元器件，以求降低产品的生产成本。

（4）全面构思、周密设计产品的结构，使产品具有良好的操纵、维护性能和使用性能，以降低设备的维护费用和使用费用。

## 1.2 电子设备设计制造基础

### 1.2.1 概述

#### 1.2.1.1 电子设备设计制造的依据

(1) 电子设备的性能指标 电子设备的性能指标包括电性能指标和机械性能指标。前者主要是指电信号幅度的标量(如灵敏度、输出功率等)、电信号频率的标量(如频率的精度、准确度、稳定度等)和电信号的波形标量(如调制度、非线性失真、噪声抑制等)。后者主要是指各类移动、旋动、传动的精度(如随动系统的跟踪度、定位系统的精度等)及其结构强度。此外,不同设备尚有一些特殊的性能指标和运输、储存条件。

(2) 设备的环境条件 设备的环境条件,主要指气候条件、机械作用力条件、化学物理条件(如金属的腐蚀、非金属的老化、酸碱粉尘、盐雾侵蚀、生物霉菌等)和电磁污染条件(各种干扰信号的侵入和辐射)。

(3) 设备的使用要求 设备的使用要求,主要包括对设备体积、重量、操作控制和维护的要求。

(4) 设备可靠性和寿命要求 设备的无故障工作时间长,承受过负荷的能力强。

(5) 设备制造的工艺性和经济性要求 设备制造的工艺性和经济性要求是既易于组织生产又造价低廉。设计应根据产品的用途性质(军用、民用、高可靠性、一般可靠性)、使用场合和产品自身的级别,参照国内外同类型先进产品型号,进行设计方案的论证;应致力于性能价格比的提高,不要盲目追求高性能、高精度指标,使制造工艺复杂、成本增高。

#### 1.2.1.2 电子设备设计制造的顺序

##### 1. 预研阶段

预研阶段的工作,一般按拟订研究方案、试验研究两道程序进行。

(1) 拟订研究方案 其目的是确定研究工作的方向和途径,其主要工作内容如下:

- ① 搜集国内、外有关的技术文献、情报资料,必要时调查、研究实际使用中的技术要求。
- ② 编制研究任务书,拟订研究方案,提出专题研究课题,明确其主要技术要求。
- ③ 审查、批准研究任务书和研究方案。

(2) 试验研究 其目的是为了通过研究探索工作,以解决关键技术课题,得出准确、可靠的数据和结论,其主要工作内容是:

- ① 对已确定的各专项研究课题,进行理论分析、计算,探讨解决的途径,减少盲目性。
- ② 设计、制造试验研究需用的零件、部件、整件、必要的专用设备和仪器。
- ③ 展开试验研究工作,详细观察、记录和分析试验的过程与结果,掌握第一手资料。
- ④ 整理试验研究的各种原始记录,进行全面分析,编写预研工作报告。

(3) 预研工作完成时应达到的条件

- ① 具备整理成册的各种试验数据记录、各项专题的试验研究报告等原始资料。
- ② 具备预研报告书。

## 2. 设计性试制阶段

凡自行设计或测绘试制的产品，一般都要经过设计性试制阶段，其工作程序一般分为下列几项。

### (1) 论证产品设计方案，下达设计任务书

- ① 搜集国内、外有关产品的设计、试制、生产的情报资料及样品。
- ② 调研实际使用中设备的技术要求，确定试制产品目标。
- ③ 会同使用部门编制设计任务书草案，同时提出产品设计方案，论证主要技术指标，批准下达设计任务书。

### (2) 进行初步设计和理论计算

- ① 进行理论计算，按计算结果，对产品或整个体系的各个部分合理分配参数。
- ② 通过必要的试验，进一步落实设计方案，提出线路、结构和工艺技术等关键环节的解决方案。

### ③ 编制初步设计文件。

### ④ 对需用的人力、物力进行概算。

### (3) 进行技术设计

- ① 根据对技术指标的修正意见，进一步调整分配各部分的参数。
- ② 拟定标准化综合要求。
- ③ 编制技术设计文件。
- ④ 对结构设计进行工艺性审查，制订工艺方案。

### (4) 进行样机制造

- ① 编制产品设计工作图纸与必要的工艺文件。
- ② 设计制造必要的工艺装置和专用设备。
- ③ 试验掌握关键工艺和新工艺。
- ④ 制造零、部、整件与样机。
- ⑤ 对样机进行调整，进行性能试验和环境试验，对是否可提交现场试验做出结论。

### (5) 现场试验与鉴定

- ① 现场试验检查产品是否符合设计任务书规定的主要性能指标与使用要求；通过试验编写技术说明书。

### ② 组织鉴定，对能否设计定型做出结论。

### (6) 设计性试制工作结束时应达到下列要求：

- ① 具备产品设计方案的论证报告、初步设计文件、技术设计文件。
- ② 具备产品设计工作图纸及技术条件。
- ③ 具备产品工艺方案及必要的工艺文件。
- ④ 具备整理成册的各种试验的原始资料、试验方法与规程。
- ⑤ 具备必要的专用工艺装置、设备及其设计图纸。
- ⑥ 具备对设备结构的工艺性审查报告、标准化审查报告及产品的技术经济分析报告。
- ⑦ 具备一定数量的样机及现场试验报告。
- ⑧ 具备产品需用的原材料、协作配套件及外购件汇总表。

## 3. 生产性试制阶段

### (1) 主要内容

- ① 修改产品设计文件，修改与补充生产工艺文件。

② 培训人员，必要时调整工艺装置，组织生产线，补充设计和制造工艺装置、专用设备。

③ 按照设计文件、工艺文件，使用工艺装置、专用设备制造零件，进行装配、调试，考验各种文件及装置的适用性及合理性。

④ 做好原始记录，统计分析各种技术定额。

⑤ 拟订正式生产时的工时及材料消耗定额，计算产品劳动量及成本。

(2) 生产性试制工作结束应达到的条件

① 具备修改过的产品设计文件及工艺文件。

② 具备满足成批生产需要的工艺装置、专用设备及其设计图纸。

③ 根据需要，已经选定标准样机与样件。

④ 已经初步确定成批生产时的流水线和劳动组织。

⑤ 具有符合技术条件的小批量生产产品，提出了产品成本概算。

#### 4. 产品的鉴定、定型

鉴定的目的在于对一个阶段工作做出全面的评价和结论。审查时一般应邀请使用部门、研究设计单位和有关单位的代表参加。重要产品的鉴定结论应报上级机关批准。

(1) 申请设计定型的标准 产品的主要性能稳定，经现场试验（或试用）符合设计指标和使用要求；主要配套产品和主要原料可在国内解决；具备了规定的产品设计文件和技术条件。

(2) 申请生产定型的标准 具备生产条件，生产工艺经过考验，所生产的产品性能稳定；产品经试验后符合技术条件；具备了生产与验收的各种技术文件。

#### 5. 整机批量制造

(1) 原材料、元器件检验，理化分析和例行试验

工厂为保证产品质量，对进厂的原材料、辅助材料 and 外购元器件都要进行入厂质量检验。例如，原材料的理化分析、关键（或主要）元器件的例行试验。这些工作由检验部门根据供应部门提供的元器件、原材料进行。

(2) 主要元器件的老化筛选

为剔除早期失效的元器件和提高元器件的上机率，对主要元器件（特别是半导体器件）应进行老化筛选，其主要内容有高低温冲击、高温储存、带电负荷等。

(3) 零件制造

电子整机所用的零件分通用零件（包括标准零件）和专用零件两种。一般通用零件和标准零件都是外购，专用零件则由本厂自制。民用电子设备的专用零件数量不多，而军用和专用电子设备的专用零件数量较多。因此，整机厂一般都具有一定的机械加工能力，特别是模具制造能力。

(4) 通用工艺处理

通用工艺处理包括对已制造好的零件、机箱、机架、机柜、外壳、印制板、旋钮和度盘等进行电镀、油漆、丝网漏印、化学处理、热处理加工，以便提高这些零件的耐腐蚀性，并增强外观的装饰性。

(5) 组件装校

一般专用组件的装校都由专业车间进行，也可由总装车间承担。无论采取哪种方式，其目的都是使组件具有完整的独立功能。组件装配完毕之后，须对其进行调整和测试，以求得性能达标。

(6) 总装

总装包括总装前的准备、总装流水、调试、负荷试验和检验包装等工序。

① 准备加工。在流水线生产和调试以前，先将各种原材料、元器件等进行加工处理，称为

预加工（装配准备）。某些不便在流水线上操作的器件，由于事先做了预加工，也可减少在流水线上安排的困难。典型的预加工包括：导线的剪切、剥头、浸锡，元器件引脚的剪切、浸锡、预成型，插头座连接，线扎的制作、标记打印，高频电缆、金属隔离线的加工等。

② 总装流水。整机总装是在装配车间（亦称总装车间）完成的。总装应包括电气装配和结构安装两大部分，而电子设备则是以电气装配为主导、以其印制电路板组件为中心进行焊接和装配的。

流水作业操作是目前电子设备总装的主要形式。由于采用传送板或传送带顺序移动加工产品，极大地提高了劳动效率。

③ 负荷调试。一般在产品总装完成后都要进行调试和负荷试验。调试、负荷的时间和方式根据产品而定。

④ 检验包装。根据技术条件和使用要求，在总装完成后必须进行检验和必要的例行试验，将完全符合标准的产品再包装和入库。

### 1.2.1.3 电子设备虚拟设计制造技术

#### 1. 虚拟制造的基本概念

虚拟制造（VM: Virtual Manufacturing）又称拟实制造，其中的“虚拟”是指现实世界的数字化，即对真实世界的动态模拟，又称为虚拟现实技术；“制造”是虚拟现实技术在制造中的应用和实现。虚拟制造是实际制造过程在计算机上的本质体现，即采用计算机仿真和虚拟现实技术，在高性能计算机及高速网络的支持下，在计算机上群组协同工作，实现产品设计、工艺规划、加工制造、性能分析、质量检验，以及企业各级过程的管理与控制等产品制造的本质过程，以增强制造过程中的决策与控制能力。

#### 2. 虚拟制造的类型

广义的虚拟制造过程不仅包括与产品开发制造有关的工程活动的虚拟，还包含对企业组织经营有关的管理活动的虚拟。因此，虚拟设计、生产和控制机制是虚拟制造的有机组成部分，按照这种思想可将虚拟制造分成3类。

（1）以设计为中心的虚拟制造 它强调以统一制造信息模型为基础，对数字化产品模型进行仿真与分析、优化，就产品的结构性能、运动学、动力学、热力学方面的性能和可装配性进行分析，以获得对产品的设计评估与性能预测。

（2）以生产为中心的虚拟制造 它是在企业资源有限的约束条件下，对企业的生产过程进行仿真，对不同的加工过程及其组合进行优化。它分析和评价产品的“可生产性”，优化组合制造资源和环境，通过提供精确的生产成本信息对生产计划与调度进行合理化决策。

（3）以控制为中心的虚拟制造 它是将仿真技术引入控制模型，提供模拟实际生产过程的虚拟环境，使企业在考虑车间控制行为的基础上对制造过程进行优化控制。

#### 3. 虚拟制造的特征

（1）高度集成 基于计算机虚拟制造环境，进行产品设计、制造、测试，设计人员或用户可“进入”虚拟制造环境，检验其设计、加工、装配和操作，而不依赖于传统的原型样机的反复修改。通过综合运用系统工程、知识工程、并行工程和人机工程等多学科先进技术，实现信息集成、知识集成、串并行交错工作机制集成和人机集成。

（2）敏捷灵活 所开发的产品（部件）可存放在计算机里，不但大大节省仓储费用，而且可根据用户需求或市场变化快速改型设计、投入批量生产，从而缩短新产品的开发周期，提高质

量,降低成本。

(3) 分布合作 它可使分布在不同地点、不同部门的专业人员在同一个产品模型上同时工作,相互交流,信息共享,减少大量的文档生成及其传递的时间和误差,从而使产品开发更快捷、优质、低耗,以适应市场需求的变化。

#### 4. 虚拟制造的关键技术

(1) 建模技术 VMS(虚拟制造系统)的建模包括产品模型(完备的产品模型使产品实施过程中的全部活动融于一体)、工艺模型(包括功能模型、物理和数学模型、统计模型、计算机工艺仿真、制造数据表和制造规划)和生产模型(静态描述和动态描述,从而可预测产品生产的全过程)的信息体系结构。

(2) 计算机仿真技术 仿真就是应用计算机对复杂的现实系统经过抽象和简化,形成系统模型,然后在分析基础上运行此模型,从而得到一系列的统计性能。基本步骤为:研究系统→收集数据→建立系统模型、确定仿真算法→建立仿真模型→运行仿真模型→输出结果并分析。

(3) 虚拟现实技术 虚拟现实技术 VRT(Virtual Reality Technology)是为改善人与计算机的交互方式、提高计算机的可操作性而产生的,它是综合利用计算机图形系统、各种显示和控制等接口设备,在计算机上生成可交互的三维环境(称为虚拟环境)中提供现实感觉的技术。

(4) 优化技术 以一定的约束条件构造合适的优化算法,通过较少的分析次数得到局部或全局的最优解。

综上所述,虚拟制造技术的推广可以帮助企业缩短设计周期、减少成本、提高产品质量、优化产品性能;使其在竞争日益激烈的市场上抓住商机,立于不败之地。我国虚拟制造技术的研究刚刚起步,系统、全面的研究尚未开展,目前仍停留在对国外的理论消化与国内环境的结合上。面对新世纪商品经济的飞速发展,VM系统在电子设备设计制造领域各方面的应用有着巨大的潜力。

## 1.2.2 电子设备结构设计基础

电子设备结构设计是研制各种类型电子设备的一个重要环节,它对保证电子设备的优良性能起着重要的作用。20世纪中、后期,伴随着固体电路、集成电路、大规模集成电路的相继出现,电子设备开始向小型、超小型、微型组装方向发展。结构设计中一些传统的设计方法逐步被机电结合、光电结合等新技术所取代。尤其是超大规模集成电路及其衍生的各种功能模块的出现,使许多曾被视为不可逾越的纯机械技术和工艺失去意义,同时也给电子设备的结构设计注入了新的内容。

### 1.2.2.1 电子设备结构设计内容

#### 1. 整机组装结构设计

整机组装结构设计也称总体设计。根据产品的技术条件和使用环境条件,对整机的组装进行系统构思,并对各分系统和功能性单元提出设计要求和规划。具体包括以下内容:

(1) 结构单元 包括机柜、机箱(或插入单元)壳体的结构形式、外观造型、装配和安装方式、人工和自动操作方式以及其他附件。

(2) 传动和执行装置 信号在传递或控制过程中,某些参数(声、光、电或机械)的调节和控制所必需的各种传动装置、组件和执行元件。

(3) 环境防护 包括元件、组件及整机的温度控制、防腐、防潮、防霉、振动与冲击隔离、屏蔽与接地、接插与互连等。

(4) 总体布局 对各零部件、组件合理地进行结构布局,以确定相互之间的连接形式和结构尺寸等。

## 2. 热设计

电子设备的热设计是指对电子元件、组件以及整机的温升控制。尤其是高密度组装的设备,更需注意其热量的排除。温升控制的方法包括自然冷却、强迫风冷、强迫液冷、蒸发冷却、温差电致冷、热管传热等各种形式。

## 3. 结构的静力计算与动态参数设计

对于运载工具中使用或处于运输过程中的设备,应具有足够的强度和刚度。当结构自身不能有效地克服因机械力引起的材料疲劳、结构谐振等对电性能的影响,则要采取隔振与缓冲措施,以避免或减弱上述因素造成的性能下降。

## 4. 电磁兼容性结构设计

电子设备中的信号处理和传输系统的自动化,要求各系统具有可靠的抗干扰能力。这就需要进行诸如电磁屏蔽、接地等电磁兼容性设计,以提高设备对电磁环境的适应性。其措施包括噪声源的抑制、消除噪声的耦合通道和抑制接收系统的噪声等。

## 5. 传动和执行装置设计

电子设备在完成信号的产生、放大、变换、发送、接收、显示和控制的过程中,需要对各种参数(声、光、电或机械)进行调节和控制。因此要有相应的传动装置或执行元件来完成这项功能。这里除了常规的机械传动装置设计之外,主要是与声、光、电性能密切相关的转动惯量、传动精度、刚度和摩擦系数等参数的设计。

## 6. 防腐蚀设计

恶劣的气候条件会引起电子设备中金属和非金属材料发生腐蚀、老化、霉烂、性能显著下降等各种损坏。应根据设备所处环境条件的性质、影响因素的种类、作用强度的大小来确定相应的防护措施或防护结构,选择耐腐蚀材料,并研究新的抗腐蚀方法。

## 7. 连接设计

电子设备中存在着大量的固定、半固定以及活动的电气触点。这些触点的接触可靠性对整机或系统的可靠性有很大的影响。必须正确地设计、选择连接方法和工艺,如焊接、压接、熔接等。同时,还应注意对各种接插件、开关件等活动连接件的选用。

## 8. 人机工程学在结构设计中的应用

电子设备既要满足电性能指标的要求,又要使设备的操作者感到方便、灵活、安全,外形美观、大方。这就要求用人机工程学的基本原理来考虑人与设备的相互关系,设计出符合人的生理、心理特点的结构与外形,更好地发挥人和机器的效能。

## 9. 可靠性试验

可靠性是衡量电子设备质量的极其重要的指标。对于特殊用途的设备,必须根据技术要求对设备或者模拟设备进行可靠性试验或加速寿命试验,以确认设计的正确性及其可靠性指标。

### 1.2.2.2 电子设备结构设计方法

电子设备由于品种多、可靠性高,采用传统的设计方法往往造成结构设计工作周期长、成本高的局面,只有充分应用现代设计方法,才能使结构设计更好地适应电子设备的多品种、小批量、高可靠性的特点,提高设计质量,缩短设计周期,降低设计成本,从而满足电子设备研制、生产

的需要。

从 20 世纪 60 年代末期开始,设计领域中相继出现了一系列新兴理论与方法,这些方法统称为现代设计方法,主要有计算机辅助设计、优化设计、可靠性设计、有限元法、动态设计、人工神经元计算方法、工程遗传算法、智能工程、价值工程、工业艺术造型设计、人机工程、并行工程、模块化设计、相似性设计、摩擦学设计、三次设计、反求工程设计等。

### 1. 现代设计方法的主要特点

(1) 系统性 传统设计方法是经验类比的设计方法,用收敛性的思维方法,过早地进入具体方案,功能原理分析既不充分又不系统,不强调创新,也很难得到最优方案。现代设计方法是逻辑的、系统的设计方法。

(2) 社会性 现代设计开发新产品的整个过程都要以面向社会、面向市场为指导思想,从产品的概念形成到报废处理的全寿命周期中的所有问题,全面考虑解决。而传统设计注意技术性,很少考虑社会性问题。

(3) 创造性 现代设计激励创造冲动,突出创新意识。

(4) 最优化 现代设计重视综合集成,在性能、技术、经济、制造工艺、使用、环境等各种约束条件下和广泛的学科领域之间,通过计算机以高效率综合集成最新科技成果,寻求最优方案和参数,而传统设计属于自然优化。

(5) 动态化 现代设计在静态分析的基础上,考虑载荷谱、负载率等随机变量,进行动态多变量最优化设计。

(6) 宜人性 现代设计在保证产品物质功能的前提下,强调产品的精神功能。

(7) 智能化 现代设计使用计算机模仿人的智能活动,能够设计出高度智能化的产品。

### 2. 计算机辅助设计

计算机辅助设计(CAD)是随着计算机及其外围设备的发展而形成的一门技术,是计算机科学与工程科学技术之间跨学科的边缘学科,是一种重要的现代设计方法,也是近年来我国大力推广的一项新技术。CAD是指设计者以具有高速计算能力和显示图形的计算机为工具,用各自的专业知识对产品进行规划、分析计算、综合、模拟、评价、绘图和编写技术文件等设计活动的总称。在电子设备的研制和生产过程中,从方案设计到设计出图,都采用 CAD 来完成,包括设备的外观造型设计、热设计计算、强度与刚度计算、装配设计、装配干涉检查、传动机构的运动模拟试验和自动绘图等,使设计师在显示屏幕上边设计、边修改和边验算,完全摆脱了传统的设计方法,使设计变得非常直观、方便、快捷、精确。在结构设计工作中,绘图工作量约占总设计工作量的 50%~60%,这样,大大地减少了设计计算、制图和制表所需的时间,减少了许多过去手工作图那种枯燥的重复性工作,提高了设计的工作效率,缩短了设计周期。另外,图样按统一的标准格式输出,质量高,图样版面清晰、规范、干净、漂亮。

### 3. 模块化设计

产品模块化设计,可以满足日益增长的多品种、多规格的要求。尽量做到零、部件标准化,非标零、部件通用化,零、部件设计模块化,这样,大大地减少了设计工作量,减少了重复出现的技术过失,增大了结构的互换性、维修性和生产性。

### 4. 并行工程

并行工程是集成地、并行地设计产品及其相关的各种过程的系统方法。并行工程的目的在于寻求新产品的易制造性、缩短上市周期和增强市场竞争力。要求涉及产品的所有部门和工程技术人员,集中起来组成并行设计组共同设计制造产品;对产品的各种性能和制造过程进行分析评议,



不断改进设计,取得优良结果,一次成功。并行工程的内涵还包含了人的因素和企业文化。如果说传统的串行工程方法容易造成各自为政、效率低下的话,并行工程方法则能改变企业组织结构和工作方法,促进人们之间的相互理解,激励积极性,提高协同作战的能力,塑造良好的企业文化氛围,形成一个适合人类发展需要的社会-技术系统。例如在设备研制、生产的整个过程中,电路师、结构师、工艺师和标准化师组成并行组,积极地投入到研制、生产中。一方面,使结构设计在充分满足电路设计的前提下,更好地适应实际的工艺要求;另一方面,使结构设计在充分满足电路设计的前提下,更加符合国家的有关技术规范、法令和标准。这样一来,使作为工程语言的设计图样更加有利于操作,有利于设备的研制和生产。

### 5. 价值工程

产品价值等于产品功能与产品成本之比。价值工程从产品的功能研究开始,对产品进行设计,或重新审查设计图样文件,剔除那些与用户要求的功能无关的材料、结构、零部件,设计出功能相同而成本更低的产品。在设备研制、生产的整个过程中,一方面,在满足使用要求的前提下,尽量设计成易加工的结构件形式,尽量降低结构件的加工精度要求,降低制造成本。有些不重要的尺寸,由未注尺寸和形位公差来控制;另一方面,在满足性能和可靠性的前提下,结构设计尽量选用价格低、易采购的材料,以降低成本,利于组织生产。

## 1.2.3 电子设备制造材料基础

### 1.2.3.1 金属材料

我们的祖先远在三千年前就掌握了一些冶铁、炼钢、铸锻和热处理的技艺,比欧洲要早 1700 多年,对世界文明与人类进步作出过重要的贡献。如今,金属材料仍占据材料工业的主导地位。

#### 1. 黑色金属

黑色金属:如生铁、铁合金、铸铁、钢、合金钢等。

##### (1) 铁的常用分类

① 生铁。生铁是指把铁矿石放到高炉中冶炼而成的产品,也称“铸铁”。含碳量为 2.11%~6.67%,并含有硅、硫、锰、磷等杂质。生铁可分为普通生铁和合金生铁,前者包括炼钢生铁和铸造生铁,后者主要是锰铁和硅铁,在炼钢时作钢的脱氧剂和合金元素添加剂。

生铁质硬而脆,缺乏韧性,几乎没有塑性变形能力,因此不能通过锻造、轧制、拉拔等方法加工成型。但含硅高的生铁(灰口铁)的铸造及切削性能良好。

a. 炼钢生铁。炼钢生铁含硅量不大于 1.7%,碳以  $\text{Fe}_3\text{C}$  状存在。炼钢生铁硬而脆,断口呈白色,主要用做炼钢原料和可锻铸铁原料。

b. 铸造用生铁。铸造生铁硅含量为 1.25%~3.6%,碳多以石墨状态存在。铸造用生铁断口呈灰色,软、易切削加工,主要用来生产各种铸铁件原料如床身、箱体等。

c. 球墨铸造用生铁。球墨铸造用生铁也是一种铸造生铁,只是低硫低磷。低硫使碳充分在铁中石墨化,低磷提高生铁的机械性能;主要用于生产性能(机械性能)较好的球墨铸铁件。

② 铸铁。铸铁是含碳大于 2.11%的铁碳合金,它是将铸造生铁(部分炼钢生铁)在炉中重新熔化,并加进铁合金、废钢、回炉铁调整成分而得到。与生铁的区别是铸铁是二次加工,大都加工成铸铁件。铸铁件具有优良的铸造性,可制成复杂零件,一般都具有良好的切削加工性;另外,具有耐磨性良好、价格低等特点。

a. 白口铸铁。碳全部以渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 形式存在。断口呈亮白色, 故称白口铸铁。白口铸铁硬度高、脆性大、很难加工, 大多用做炼钢和可锻铸铁的坯料。

b. 灰口铸铁。铸铁中的碳大部或全部以自由状态片状石墨存在, 断口呈灰色。它具有良好的铸造性能, 切削加工性好, 耐磨性好, 熔化配料简单, 成本低, 广泛用于制造结构复杂铸件和耐磨件。灰口铸铁按基体组织不同, 分为铁素体基灰口铸铁、珠光体-铁素体基灰口铸铁和珠光体基灰口铸铁三类。

c. 可锻铸铁。可锻铸铁是用碳、硅含量较低的铁碳合金铸成白口铸铁坯件, 再经过长时间高温退火处理, 使渗碳体分解出团絮状石墨而成。可锻铸铁按热处理后显微组织不同分两类: 一类是黑心可锻铸铁和珠光可锻铸铁; 另一类是白心可锻铸铁。黑心可锻铸铁主要用于制造轮壳、弹簧支座、阀门等。珠光体可锻铸铁则用于制造曲轴、连杆、轮轴、活塞环等。

d. 球墨铸铁。在铁水(球墨生铁)浇注前加一定量的球化剂(常用的有硅铁、镁等)使铸铁中石墨球化。由于碳(石墨)以球状存在于铸铁基体中, 改善其对基体的割裂作用, 球墨铸铁的抗拉强度、屈服强度、塑性、冲击韧性大大提高。并具有耐磨、减振、工艺性能好、成本低等优点, 现已广泛替代可锻铸铁及部分铸钢。

## (2) 钢的常用分类

当铁中含碳量在 0.03%~1.2% 范围时则为钢。炼钢原料除生铁、废钢外, 还有去除不纯物用的熔剂, 如生石灰、萤石和脱氧剂等, 使钢的品质得以提高。炼钢方法主要有转炉、电炉和平炉三种。

① 按品质分类。普通钢(磷含量 $\leq 0.045\%$ , 硫含量 $\leq 0.050\%$ ); 优质钢(磷、硫含量均 $\leq 0.035\%$ ); 高级优质钢(磷含量 $\leq 0.035\%$ , 硫含量 $\leq 0.030\%$ )。

### ② 按化学成分分类。

a. 碳素钢。低碳钢(碳含量 $\leq 0.25\%$ ); 中碳钢( $0.25\% < \text{碳含量} \leq 0.60\%$ ); 高碳钢(碳含量 $> 0.60\%$ )。碳素钢具有不错的机械性质, 能实施热处理, 而且在一般用途上都能胜任。

b. 合金钢。合金钢是指碳钢添加一种或一种以上合金元素所形成的钢料。所添加的合金元素主要有镍(Ni)、铬(Cr)、钨(W)、钒(V)、锰(Mn)、钼(Mo)、钴(Co)、硅(Si)、钛(Ti)、硼(B)等。例如, 12%的铬可以使钢不易腐蚀, 成为耐蚀钢; 加入 18%钨、4%铬、1%钒时即为高速钢。

a) 钢中主要合金元素的功用。合金钢因其添加元素和量的不同而特性迥异。铬在钢中和碳作用形成稳定而硬的碳化物, 能增进钢的硬度; 还能增进钢的抗腐蚀性、耐磨性。钛在不锈钢中, 可以防止高温时铬量的局部减少, 维持其防锈的能力。

镍在钢中的影响有增进钢的硬度, 增加钢的韧性。高镍合金钢能耐腐蚀, 例如不锈钢就含有 8%左右的镍。钴可代替镍增加强度及耐热等性能, 但会降低钢的硬度。钴增加钢的保磁能力, 是制造磁石钢的主要元素。

锰和钼可增加钢的强度及硬度。硅能增加钢的电磁传导率, 故适于制造电气材料。钨能耐高温, 而且溶于钢中会与碳形成碳化物称为碳化钨, 能提高钢的强度, 还可加入钢中制造永久磁钢。

铜可以增加钢的强度, 含量不可以超过 1.5%, 否则会使钢变脆。此外, 铜在钢中有抵抗空气腐蚀的性能, 当低碳钢内含铜 1%时, 其抵抗空气腐蚀性较不含铜的高出约 4 倍; 在不锈钢中加铜 3%~4%, 也有助于不锈钢的防锈作用。

硫在钢中为有害的杂质, 硫与铁化合成成为  $\text{FeS}$ , 与锰化合成  $\text{MnS}$ , 其结果会使钢强度降低, 增加钢的热脆性。硫含量 0.2%以上, 就会严重影响钢的强度和韧性。

b) 合金钢的分类。按合金元素含量可分为低合金钢（合金元素总含量≤5%）、中合金钢（合金元素总含量 5%~10%）、高合金钢（合金元素总含量>10%）。普通低合金钢的强度比较高，综合性能比较好，耐腐蚀，耐磨，耐低温，并具有较好的切削性能、焊接性能。

合金钢也可依照加入元素的种类来区分。由于任何钢中均含铁、碳两种元素，因此，如再加入一种元素即称为三元钢，如镍钢、钼钢等。加入两种元素称为四元钢，如镍钼钢。

就用途来区分，合金钢可以分为一般构造用合金钢和特殊钢。构造用合金钢适用于普通机械，合金量较低；而特殊钢大多使用在需要高硬度、耐蚀、耐热、磁性等场合，合金量高，见表 1-2。

表 1-2 合金钢的用途

分 类		钢 种		主 要 合 金		典 型 用 途	
构造用合金钢		高强度低合金钢		低 Mn、低 Si-Mn		汽车车身、构造用机件	
		热处理用中合金钢（强韧钢）		Ni、Cr、Ni-Cr、Cr-Mo、Ni-Cr-Mo		曲柄轴、螺栓、齿轮	
		表面硬度钢	渗碳钢	Ni、Ni-Cr、Cr-Mo、Ni-Cr-Mo		齿轮、变速箱	
			氮化钢	Al-Cr、Al-Cr-Mo、Al-Cr-Mo-Ni、		汽缸套、车床主轴	
特殊钢	工具钢	切削用钢		W、Cr-W、Cr-Mn		牙攻、车刀、铣刀	
		耐冲击用钢		Cr-W、Cr-W-V		冲头、铆钉具	
		耐磨用钢		高 C-高 Cr、Cr-W、Cr-Mo-V		号规、拉线模、整缘模具	
		热加工用钢		Mn、Cr-W-V、Ni-Cr-Mo、Mn-Cr		热辊轧模、压铸模	
	耐蚀钢	不锈钢		Cr、Cr-Ni		外科刀具	
		耐酸钢		Ni、Cr-Ni、高 Si		化学工业	
	耐热钢		Cr、Cr-Ni、Si-Cr、Cr-Al		进气阀、排气阀、轮机叶片		
	弹簧钢		Si-Mn、Si-Cr、Cr-V		各式弹簧		
	轴承钢		高 C 高 Cr、高 C-Cr-Mn		球轴承		
	特殊钢	电气用钢	非磁性钢（避磁钢）		Ni、Cr-Ni、Cr-Mn		输配线支撑、罗盘外壳
磁性钢			Si（硅钢）		变压器铁芯		
磁石钢		Cr、W、Cr-W-Co		永久磁铁			
超高强度钢		高 Ni、Cr-Ni-Mo、Ni-Co		钢梁、飞机骨架			

在钢中添加 Cr 和 Ni 可以增加钢的耐蚀性。在空气及海水环境中，钢的耐蚀性随 Cr 量的增加而增加，含 Cr 量在 12%以上，就几乎不会发生腐蚀。不锈钢耐蚀的原因，是 Cr 能在钢的表层形成一种致密的氧化铬膜，可以阻隔钢料内部的氧化作用，因而可以防止一般空气环境下的腐蚀。但是，如果铬钢在强酸（如硫酸、盐酸）环境中，这层氧化膜就会被破坏而丧失耐蚀性。在含有硫酸及盐酸的环境中，钢的耐蚀性随 Ni 量的增加而增大，由此可知，一般环境下使用，不锈钢只需添加 Cr，就可以防止发生腐蚀的现象，然而在特定环境下（如在硫酸、盐酸中）使用，就必须再添加 Ni，才能达到防蚀的目的。

磁石钢主要用于制造永久磁铁，属于硬磁材料。

③ 按成型方法分类。可分为锻钢、铸钢、热轧钢、冷拉钢。

④ 按用途分类。

a. 工程用钢。普通碳素结构钢；低合金结构钢；钢筋钢。碳素结构钢主要保证力学性能，故其牌号用 Q 加数字表示。其中，“Q”为屈服点“屈”字的汉语拼音字首，数字表示屈服点数值。例如，Q275 表示屈服点为 275MPa。通常 Q195、Q215、Q235 钢，碳的质量分数低，焊接性能好，塑性、韧性好，有一定强度，常轧制成薄板、钢筋、焊接钢管等；常用于建筑结构和制造普通铆

钉、螺钉、螺母等零件。Q255 和 Q275 钢，碳的质量分数稍高，强度较高，塑性、韧性较好，可进行焊接，通常轧成型钢、条钢和钢板，用做结构件以及制造简单机械的连杆、齿轮、联轴节、销等零件。

b. 结构钢。

a) 机械制造用钢。调质结构钢；表面硬化结构钢（包括渗碳钢、渗氮钢、表面淬火用钢）；易切削结构钢；冷塑性成型用钢（包括冷冲压用钢、冷镦用钢）。

易切削结构钢是在钢中加入一些使钢变脆的元素，使钢在切削时易脆断成碎屑，从而有利于提高切削速度和延长刀具寿命。使钢变脆的元素主要是硫，硫化锰很脆并有润滑效能，从而使切屑容易碎断，并有利于提高加工表面的质量。

b) 弹簧钢。弹簧用的钢料必须具备耐冲击、疲劳限高而且不产生永久变形的特性，适用的钢料大致可以分为碳钢、硅锰钢、硅锰铬钢三类，有些特殊场合也用到耐蚀钢。弹簧的制造必须先初化、成型，然后实施热处理，大型的弹簧，如板片弹簧等，系将热轧的板或棒，高温加工成型，在  $80\sim 850^{\circ}\text{C}$  淬火于油中或水中，再经  $400\sim 500^{\circ}\text{C}$  回火后使用。小型弹簧，如螺旋弹簧等，必须将初化处理后冷抽的钢线（通常称为琴钢线），冷加工成型，再加热于  $300\sim 350^{\circ}\text{C}$  蓝化处理，以提高疲劳限。

c) 轴承钢。轴承必须耐磨、有足够的强度及很高的疲劳限。最常使用的材料为高碳低铬钢，其成分为  $0.95\%\sim 1.10\%\text{C}$ 、 $0.9\%\sim 1.6\%\text{Cr}$ 、 $0.5\%\sim 0.9\%\text{Mn}$ 、 $0\%\sim 0.25\%\text{Mo}$ ；此外，轴承钢属于高级合金钢，所以磷、硫含量必须在  $0.025\%$  以下。

c. 工具钢。

a) 碳素工具钢。碳素工具钢基本上不含合金元素，含碳量在  $0.65\%\sim 1.35\%$  范围内，其生产成本低，原料易获得，切削加工性良好，热处理后可以得到高硬度和高耐磨性，用来制造各种刀具、模具和量具。但这类钢的红硬性差，即当工作温度大于  $250^{\circ}\text{C}$  时，钢的硬度和耐磨性就会急剧下降而失去工作能力。另外，碳素工具钢若制成较大的零件则不易淬硬，而且容易产生变形和裂纹。

b) 合金工具钢。合金工具钢是含有多种合金元素（如硅、铬、钨、钼、钒等）的中、高碳钢。合金工具钢容易淬硬，不易产生变形和裂纹，适用于制造尺寸大、形状复杂的刀具、模具和量具。

c) 高速工具钢。高速工具钢是高碳高合金工具钢，钢中含碳量为  $0.7\%\sim 1.4\%$ ，钢中含有能形成高硬度碳化物的合金元素，如钨、钼、铬、钒。高速工具钢具有高的红硬性，在高速切削的条件下，温度高达  $500\sim 600^{\circ}\text{C}$  硬度也不降低，从而保证良好的切削性能。

d. 特殊性能钢。不锈钢耐酸钢；耐热钢（包括抗氧化钢、热强钢、气阀钢）；电热合金钢；耐磨钢；低温用钢；电气用钢。

耐热钢主要合金元素的含量为： $14\%\sim 26\%\text{Cr}$ 、 $12\%\sim 37\%\text{Ni}$ 、 $0.1\%\sim 0.4\%\text{C}$ 、 $0\sim 3\%\text{W}$  等。耐热钢高温强度大，加工性、焊接性良好，主要用于热交换器等。

电气用钢属于软磁材料，主要用于制造变压器、电动机（马达）等的铁芯材料。良好的铁芯材料必须利于导通磁力线以提高效率，所以磁阻要低、导磁性要好，并且要容易磁化及退磁，残留磁力小以减少磁滞损失。常用的铁芯材料有纯铁、硅钢、铁镍合金、铁钴合金、铁氧磁体等，其中以纯铁及硅钢较为常用。纯铁的导磁性好，但是因为比电阻小，涡流损失大，因此添加硅，硅含量高时材质便脆化，因此一般在  $5.5\%$  以下，此外，硅钢片制成片状相叠也可以降低涡流损失。

⑤ 按钢材外形分类。钢材按外形可分为型材、板材、管材、金属制品四大类。为便于采购、订货和管理，我国目前将钢材分为十六大品种（见表 1-3）。

表 1-3 钢材品种

类 别	品 种	说 明
型材	重轨	每米重量大于 30kg 的钢轨（包括起重轨）
	轻轨	每米重量小于或等于 30kg 的钢轨
	大型型钢	普通钢圆钢、方钢、扁钢、六角钢、工字钢、槽钢、等边和不等边角钢及螺纹钢等，按尺寸大小分为大、中、小型
	中型型钢	
	小型型钢	
	线材	直径 5~10mm 的圆钢和盘条
	冷弯型钢	将钢材或钢带冷弯成型制成的型钢
	优质型材	优质钢圆钢、方钢、扁钢、六角钢等
	其他钢材	包括重轨配件、车轴坯、轮箍等
板材	薄钢板	厚度等于和小于 4mm 的钢板
	厚钢板	厚度大于 4mm 的钢板，可分为中板（厚度 4~20mm）、厚板（厚度 20~60mm）、特厚板（厚度大于 60mm）
板材	钢带	也称带钢，实际上是长而窄并成卷供应的薄钢板
	电工硅钢薄板	也称硅钢片或矽钢片
管材	无缝钢管	用热轧、热轧—冷拔或挤压等方法生产的管壁无接缝的钢管
	焊接钢管	将钢板或钢带卷曲成型，然后焊接制成的钢管
金属制品	金属制品	包括钢丝、钢丝绳、钢绞线等

2. 有色金属

(1) 有色金属分类

① 有色纯金属。分为重金属、轻金属、贵金属、半金属和稀有金属五类。

② 有色合金。按合金系统分重有色金属合金、轻有色金属合金、贵金属合金、稀有金属合金等；按合金用途则可变变形（压力加工用）合金、铸造合金、轴承合金、印刷合金、硬质合金、焊料、中间合金、金属粉末等。

③ 有色材。按化学成分分为铜和铜合金材、铝和铝合金材、铅和铅合金材、镍和镍合金材、钛和钛合金材；按形状分类时，可分为板、条、带、箔、管、棒、线、型等品种。

(2) 铜及铜合金

① 纯铜。纯铜是玫瑰红色金属，表面形成氧化铜膜后呈紫色，故工业纯铜常称紫铜或电解铜。纯铜导电性很好，大量用于制造电线、电缆、电刷等；导热性好，常用来制造防磁性干扰的磁学仪器、仪表，如罗盘、航空仪表等；塑性极好，易于热压或冷压力加工，可制成管、棒、线、条、带、板、箔等铜材。纯铜产品有冶炼品及加工品两种。

② 铜合金。

a. 黄铜。黄铜是铜与锌的合金。最简单的黄铜是铜-锌二元合金，称为简单黄铜或普通黄铜。改变黄铜中锌的含量可以得到不同机械性能的黄铜。黄铜中锌的含量越高，其强度也越高，塑性稍低。工业中采用的黄铜含锌量不超过 45%，否则将会产生脆性，使合金性能变坏。

为了改善黄铜的某种性能，在一元黄铜的基础上加入其他合金元素的黄铜称为特殊黄铜。常用的合金元素有硅、铝、锡、铅、锰、铁与镍等。在黄铜中加铝能提高黄铜的屈服强度和抗腐蚀性，稍降低塑性；含铝小于 4% 的黄铜具有良好的加工、铸造等综合性能。在黄铜中加 1% 的锡能显著改善黄铜的抗海水和海洋空气腐蚀的能力，因此称为“海军黄铜”；锡还能改善黄铜的切削

加工性能。

黄铜加铅的主要目的是改善切削加工性和提高耐磨性，铅对黄铜的强度影响不大。锰黄铜具有良好的机械性能、热稳定性和抗蚀性；在锰黄铜中加铝，还可以改善它的性能，得到表面光洁的铸件。黄铜可分为铸造和压力加工两类产品。

b. 青铜。青铜是历史上应用最早的一种合金，原指铜锡合金，因颜色呈青灰色，故称青铜。现在除黄铜和白铜（铜镍合金）以外的铜合金均称为青铜。锡青铜有较高的机械性能、较好的耐蚀性、减摩性和好的铸造性能；对过热和气体的敏感性小，焊接性能好，无铁磁性，收缩系数小。锡青铜在空气、海水、淡水和蒸汽中的抗蚀性都比黄铜高。

由于锡是一种稀缺元素，所以工业上还使用许多不含锡的无锡青铜，它们不仅价格便宜，还具有所需要的特种性能。主要有铝青铜、铍青铜、锰青铜、硅青铜等。铝青铜有比锡青铜高的机械性能，耐磨、耐蚀、耐寒、耐热、无铁磁性，有良好的流动性，无偏析倾向，可得到致密的铸件。在铝青铜中加入铁、镍和锰等元素，可进一步改善合金的各种性能。

青铜也分为压力加工和铸造产品两大类。

c. 白铜。以镍为主要添加元素的铜基合金呈银白色，称为白铜。铜镍二元合金称普通白铜，加锰、铁、锌和铝等元素的铜镍合金称为复杂白铜，纯铜加镍能显著提高强度、耐蚀性、电阻和热电性。工业用白铜根据性能特点和用途不同分为结构用白铜和电工用白铜两种，分别满足各种耐蚀和特殊的电、热性能。白铜多经压力加工成白铜材。

③ 铜材。以纯铜或铜合金制成各种形状（包括棒、线、板、带、条、管、箔等）统称铜材。铜材的加工方法有轧制、挤制及拉制等，铜材中板材和条材有热轧的和冷轧的；而带材和箔材都是冷轧的；管材和棒材则分为挤制品和拉制品；线材都是拉制的。

### （3）铝及铝合金

铝是一种轻金属，密度小。铝合金具有较好的强度，超硬铝合金的强度可达 600MPa，普通硬铝合金的抗拉强度也达 200~450MPa。铝的导电性仅次于银和铜，居第三位，用于制造各种导线。铝具有良好的导热性，可用做各种散热材料。铝还具有良好的抗腐蚀性能；其较好的塑性适合于各种压力加工。

铝合金按加工方法可以分为变形铝合金和铸造铝合金。变形铝合金又分为不可热处理强化型铝合金和可热处理强化型铝合金。不可热处理强化型不能通过热处理来提高机械性能，只能通过冷加工变形来实现强化，它主要包括高纯铝、工业高纯铝、工业纯铝以及防锈铝等。可热处理强化型铝合金可以通过淬火和时效等热处理手段来提高机械性能，它可分为硬铝、锻铝、超硬铝和特殊铝合金等。

铸造铝合金按化学成分可分为铝硅合金、铝铜合金、铝镁合金和铝锌合金。

① 纯铝产品。纯铝分冶炼品和压力加工品两类，前者以化学成分 Al 表示，后者用汉语拼音 LG（铝、工业用的）表示。

② 压力加工铝合金。铝合金压力加工产品分为防锈（LF）、硬质（LY）、锻造（LD）、超硬（LC）、包覆（LB）、特殊（LT）及钎焊（LQ）七类。常用铝合金材料的状态为退火（M 焖火）、硬化（Y）、热轧（R）三种。

③ 铝材。铝和铝合金经加工成一定形状的材料统称铝材，包括板、带、箔、管、棒、线、型等。

④ 铸造铝合金。铸造铝合金（ZL）按成分中铝以外的主要元素硅、铜、镁、锌分为四类，代号编码分别为 100、200、300、400。

⑤ 高强度铝合金。高强度铝合金抗拉强度大于 480MPa，主要是压力加工铝合金中硬铝合金类、超硬铝合金类和铸造合金类。

### 3. 金属材料性能

#### (1) 金属材料的理化性能

① 常用金属材料包括黑色、有色金属材料及其合金材料的密度见表 1-4。

表 1-4 常用金属密度

材 料 名 称		密度 (g/cm <sup>3</sup> )	材 料 名 称		密度 (g/cm <sup>3</sup> )
灰口铸铁		6.6~7.4	不锈钢	1Cr18Ni11Nb、Cr23Ni18	7.90
白口铸铁		7.4~7.7		2Cr13Ni4Mn9	8.50
可锻铸铁		7.2~7.4		3Cr13Ni7Si2	8.00
铸钢		7.80	纯铜材		8.90
工业纯铁		7.87	59、62、65、68 黄铜		8.50
普通碳素钢		7.85	80、85、90 黄铜		8.70
优质碳素钢		7.85	96 黄铜		8.80
碳素工具钢		7.85	59-1、63-3 铅黄铜		8.50
易切钢		7.85	74-3 铅黄铜		8.70
锰钢		7.81	90-1 锡黄铜		8.80
15CrA 铬钢		7.74	70-1 锡黄铜		8.54
20Cr、30Cr、40Cr 铬钢		7.82	60-1 和 62-1 锡黄铜		8.50
38CrA 铬钢		7.80	77-2 铝黄铜		8.60
铬钒、铬镍、铬镍钼、铬锰、硅、铬锰 硅镍、硅锰、硅铬钢		7.85	67-2.5、66-6-3-2、60-1-1 铝黄铜		8.50
			镍黄铜		8.50
铬镍钨钢		7.80	锰黄铜		8.50
铬钼铝钢		7.65	硅黄铜、镍黄铜、铁黄铜		8.50
含钨 9 高速工具钢		8.30	5-5-5 铸锡青铜		8.80
含钨 18 高速工具钢		8.70	3-12-5 铸锡青铜		8.69
高强度合金钢		7.82	6-6-3 铸锡青铜		8.82
轴承钢		7.81	7-0.2、6.5-0.4、6.5-0.1、4-3 锡青铜		8.80
不 锈 钢	0Cr13、1Cr13、2Cr13、3Cr13、 4Cr13、Cr17Ni2、Cr18、9Cr18、 Cr25、Cr28	7.75	4-0.3、4-4-4 锡青铜		8.90
	Cr14、Cr17	7.70	4-4-2.5 锡青铜		8.75
	0Cr18Ni9、1Cr18Ni9、Cr18Ni9Ti、 2Cr18Ni9	7.85	5 铝青铜		8.20
	1Cr18Ni11Si4AlTi	7.52	锻铝	LD8	2.77
7 铝青铜		7.80		LD7、LD9、LD10	2.80
19-2 铝青铜		7.60	超硬铝		2.85
9-4、10-3-1.5 铝青铜		7.50	LT1 特殊铝		2.75
10-4-4 铝青铜		7.46	工业纯镁		1.74
铍青铜		8.30	变形镁	MB1	1.76
3-1 硅青铜		8.47		MB2、MB8	1.78
1-3 硅青铜		8.60		MB3	1.79
1 铍青铜		8.80		MB5、MB6、MB7、MB15	1.80

续表

材 料 名 称		密度 (g/cm <sup>3</sup> )	材 料 名 称		密度 (g/cm <sup>3</sup> )
0.5 锡青铜		8.90	铸镁		1.80
0.5 铬青铜		8.90	工业纯钛 (TA1、TA2、TA3)		4.50
1.5 锡青铜		8.80	钛 合 金	TA4、TA5、TC6	4.45
5 锡青铜		8.60		TA6	4.40
白铜	B5、B19、B30、BMn40-1.5	8.90		TA7、TC5	4.46
	BMn3-12	8.40		TA8	4.56
	BZN15-20	8.60		TB1、TB2	4.89
	BA16-1.5	8.70		TC1、TC2	4.55
	BA113-3	8.50		TC3、TC4	4.43
纯铝		2.70	钛 合 金	TC7	4.40
防 锈 铝	LF2、LF43	2.68		TC8	4.48
	LF3	2.67		TC9	4.52
	LF5、LF10、LF11	2.65		TC10	4.53
	LF6	2.64		纯镍、阳极镍、电真空镍	
	LF21	2.73	镍铜、镍镁、镍硅合金		8.85
硬铝	LY1、LY2、LY4、LY6	2.76	镍铬合金		8.72
	LY3	2.73	锌锭 (Zn0.1、Zn1、Zn2、Zn3)		7.15
	LY7、LY8、LY10、LY11、LY14	2.80	铸锌		6.86
	LY9、LY12	2.78	4-1 铸造铝铜合金		6.90
	LY16、LY17	2.84	4-0.5 铸造铝铜合金		6.75
锻铝	LD2、LD30	2.70	铅和铅铋合金		11.37
	LD4	2.65	铅阳极板		11.33

② 耐腐蚀性：指金属材料抵抗各种介质侵蚀的能力。

③ 抗氧化性：指金属材料在高温下，抵抗产生氧化皮能力。

## (2) 金属材料的机械性能

在机械制造业中，一般机械零件都是在常温、常压和非强烈腐蚀性介质中使用的，且在使用过程中各机械零件都将承受不同载荷的作用。金属材料在载荷作用下抵抗破坏的性能，称为机械性能（或称为力学性能）。

金属材料的机械性能是零件设计和选材时的主要依据。外加载荷性质不同（如拉伸、压缩、扭转、冲击、循环载荷等），对金属材料要求的机械性能也将不同。常用的机械性能包括强度、塑性、硬度、冲击韧性、多次冲击抗力和疲劳极限等。下面将分别讨论各种机械性能。

① 强度。强度是指金属材料在静荷作用下抵抗破坏（过量塑性变形或断裂）的性能。屈服点亦称屈服强度，指材料在拉伸过程中，材料所受应力达到某一临界值时，载荷不再增加变形却继续增加或产生 0.2%L 时应力值，单位用牛顿/毫米<sup>2</sup>表示。抗拉强度也称强度极限，指材料在拉伸前承受最大应力值，单位用牛顿/毫米<sup>2</sup>表示。

② 塑性。塑性是指金属材料在载荷作用下，产生塑性变形（永久变形）而不破坏的能力。

③ 硬度。硬度是衡量金属材料软硬程度的指标，常用的有布氏硬度（HB）、洛氏硬度（HRA、HRB、HRC）和维氏硬度等。目前生产中测定硬度方法最常用的是压入硬度法，它是用一定几何形状的压头在一定载荷下压入被测试的金属表面，根据被压入程度来测定其硬度值。



④ 疲劳。前面所讨论的强度、塑性、硬度都是金属在静载荷作用下的机械性能指标。实际上,许多机器零件都是在循环载荷下工作的,在这种条件下零件会产生疲劳。

⑤ 冲击韧性。以很大速度作用于机件上的载荷称为冲击载荷,金属在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力叫做冲击韧性。

⑥ 延伸率。材料在拉伸断裂后,总伸长与原始标距长度的百分比。

⑦ 断面收缩率。材料在拉伸断裂后,断面最大缩小面积与原断面积的百分比。

### (3) 金属材料的工艺性能

材料的工艺性能是指材料适应冷、热加工方法的能力。

① 铸造性能。它是指金属或合金是否适合铸造的一些工艺性能,主要包括流动性能(充满铸模能力)和收缩性能(铸件凝固时体积收缩的能力)。

② 焊接性能。它是指金属材料通过加热或加热和加压焊接方法,把两个或两个以上金属材料焊接到一起,接口处能满足使用目的的特性。

③ 冲压性能。它是指金属材料承受冲压变形加工而不破裂的能力。在常温下进行冲压称为冷冲压。

④ 冷弯性能。它是指金属材料在常温下能承受弯曲而不破裂的性能。弯曲程度一般用弯曲角度 $\alpha$ (外角)或弯心直径 $d$ 对材料厚度 $a$ 的比值表示, $a$ 愈大或 $d/a$ 愈小,则材料的冷弯性愈好。

⑤ 锻造性能。它是指金属材料在锻压加工中能承受塑性变形而不破裂的能力。

### 1.2.3.2 塑料

塑料以树脂(或在加工过程中用单体直接聚合)为主要成分,以增塑剂、填充剂、润滑剂、着色剂等添加剂为辅助成分。它在加工完成时呈现固态形状,在制造以及加工过程中,可以借流动来造型。

#### 1. 塑料的主要特性

大多数塑料质轻、化学稳定性好、不会锈蚀,耐冲击性好,绝缘性好,具有较好的透明性和耐磨耗性。其成型性和着色性都好,而且加工成本低。

但容易老化,导热性低。大部分塑料耐热性差,热膨胀率大,易燃烧。多数塑料耐低温性差,低温下变脆。尺寸稳定性差,容易变形。某些塑料易溶于溶剂。

#### 2. 塑料的分类

##### (1) 按使用特性分类

根据塑料不同的使用特性,通常将塑料分为通用塑料、工程塑料和特种塑料三种类型。

① 通用塑料。一般是指产量大、用途广、成型性好、价格便宜的塑料,如聚乙烯、聚丙烯、酚醛等。

② 工程塑料。它是指能承受一定外力作用,具有良好的机械性能和耐高、低温性能,尺寸稳定性较好的塑料,如聚酰胺、聚砒等。在工程塑料中又将其分为通用工程塑料和特种工程塑料两大类。通用工程塑料包括:聚酰胺、聚甲醛、聚碳酸酯、改性聚苯醚、热塑性聚酯、超高分子量聚乙烯、甲基戊烯聚合物、乙烯醇共聚物等。

特种工程塑料又有交联型、非交联型之分。交联型的有聚氨基双马来酰胺、聚三嗪、交联聚酰亚胺、耐热环氧树脂等。非交联型的有聚砒、聚醚砒、聚苯硫醚、聚酰亚胺、聚醚醚酮(PEEK)等。

③ 特种塑料。一般是指具有特种功能,可用于航空、航天等特殊应用领域的塑料。如氟塑料和有机硅都具有突出的耐高温、自润滑等特殊功用;增强塑料和泡沫塑料具有高强度、高缓冲性等特殊性能。

增强塑料原料在外形上可分为粒状（如钙塑增强塑料）、纤维状（如玻璃纤维或玻璃布增强塑料）、片状（如云母增强塑料）三种。按材质可分为布基增强塑料（如碎布增强或石棉增强塑料）、无机矿物填充塑料（如石英或云母填充塑料）、纤维增强塑料（如碳纤维增强塑料）三种。

泡沫塑料可以分为硬质、半硬质和软质泡沫塑料三种。硬质泡沫塑料没有柔韧性，压缩硬度很大，只有达到一定应力值才产生变形，应力解除后不能恢复原状；软质泡沫塑料富有柔韧性，压缩硬度很小，很容易变形，应力解除后能恢复原状，残余变形较小。

## （2）按理化特性分类

根据各种塑料不同的理化特性，可以把塑料分为热固性塑料和热塑性塑料两种类型。

① 热固性塑料。它是指在受热或其他条件下能固化或具有不溶（熔）特性的塑料，如酚醛塑料、环氧塑料等。热固性塑料又分甲醛交联型和其他交联型两种类型。甲醛交联型塑料包括酚醛塑料、氨基塑料。其他交联型塑料包括不饱和聚酯、环氧树脂、邻苯二甲二烯丙酯树脂等。

② 热塑性塑料。它是指在特定温度范围内能反复加热软化和冷却硬化的塑料，如聚乙烯、聚四氟乙烯等。热塑性塑料又分烃类、含极性基因的乙烯基类、工程类、纤维素类等多种类型。

a. 烃类塑料。属非极性塑料，有结晶性（包括聚乙烯、聚丙烯等）和非结晶性之分。

b. 含极性基因的乙烯基类塑料。除氟塑料外，大多数是非结晶型的透明体，包括聚氯乙烯、聚四氟乙烯、聚醋酸乙烯酯等。乙烯基类单体大多数可以采用游离基型催化剂进行聚合。

c. 热塑性工程塑料。主要包括聚甲醛、聚酰胺、聚碳酸酯、ABS、聚苯醚、聚对苯二甲酸乙二酯、聚砒、聚醚砒、聚酰亚胺、聚苯硫醚等。

d. 热塑性纤维素类塑料。主要包括醋酸纤维素、醋酸丁酸纤维素、塞璐珞、玻璃纸等。

## 3. 塑料材料中英文对照（见表 1-5）

表 1-5 塑料材料中英文对照表

简 称	英 文	中 文
ABS	Acrylonitrile-Butadiene-Styrene	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物
ASA	Acrylic-Styrene-Acrylonitrile	丙烯酸-苯乙烯-丙烯腈
CA	Cellulose-Acetate	纤维素醋酸酯
CAP	Cellulose-Acetate-Propionate	纤维素醋酸丙酸酯
CB	Cellulose-Butyrate	纤维素酪酸酯
CP	Cellulose-Propionate	纤维素丙酸酯
CPE	Chlorinated-Polyethylene	氯化聚乙烯
PCTFE	Poly-chlorotrifluoroethylene	聚一氯三氟乙烯
EAA	Ethylene-Acrylic-Acid (TP)	乙烯丙烯酸
EAE	Ethylene-Acrylic-Ester (TP)	乙烯丙烯酸乙酯
ECTFE	Ethylene-chlorotrifluoroethylene	乙烯一氯三氟乙烯共聚物
EMA	Ethylene-Methyl-Acrylate (TP)	乙烯甲基丙烯酸酯
EMAA	Ethylene-Methacrylic-Acid	乙烯丙烯酸甲酯
ENBA	Ethylene-N-Butyl-Acrylate (TP)	乙烯丁基丙烯酸酯
ETFE	Ethylene-Tetrafluoroethylene	乙烯-四氟乙烯共聚物
EVA	Ethylene-Vinyl-Acetate (TP)	乙烯乙基丙烯酸酯
EVOH	Ethylene-Vinylalcohol (TP)	乙烯乙醇醇
FEP	Fluorinated-Ethylene-Propylene	氟化乙烯丙烯
HDPE	High-Density-Polyethylene	高密度聚乙烯

续表

简 称	英 文	中 文
LCP	Liquid-Crystal-Polyester	液晶聚酯
LDPE	Low-Density-Polyethylene	低密度聚乙烯
LLDPE	Linear-Low-Density-Polyethylene	线性低密度聚乙烯
IONOMER	Ionomer	离子聚合物
MDPE	Medium-Density-Polyethylene	中密度聚乙烯
PA	Polyamide	聚酰胺
PA11	Polyamide 11	聚酰胺 11
PA12	Polyamide 12	聚酰胺 12
PA4/6	Polyamide 4/6	聚酰胺 4/6
PA6	Polyamide 6	聚酰胺 6
PA6/10	Polyamide 6/10	聚酰胺 6/10
PA6/12	Polyamide 6/12	聚酰胺 6/12
PA6/6	Polyamide 6/6	聚酰胺 6/6
PA6/9	Polyamide 6/9	聚酰胺 6/9
PAI	Polyamide-Imide	聚酰胺酰亚胺
PBT	Poly-Butylene-Terephthalate	聚对苯二甲酸二丁酯
PC	Poly-Carbonate	聚碳酸酯
PCT	Poly-Carbonate hexandimethanol Terephthalate	聚环己醇二乙酯
PEC	Polyester Carbonate	聚酯碳酸酯
PEEK	Poly-Ether-Ether-Ketone	聚醚醚酮
PEI	Poly-Ether-Imide	聚醚酰亚胺
PES	Poly-Ether-Sulfone	聚醚砜
PET	Poly-Ethylene- Terephthalate	聚对苯二甲酸二乙酯
PETG	Poly-Ethylene Terephthalate-Glycol	二醇类改性 PET
PFA	Poly-Fluoro-Alkoxy	过氟烷氧基
PI	Poly-Imide	聚酰亚胺
PK	Poly-Ketides	聚酮
PMMA	Poly-Methyl-Methacrylic	聚甲基丙烯酸甲酯
PMP	Poly-Methyl-Pentene	聚甲基戊烯
Polyolefin	Polyolefin	聚烯烃
POM	Poly-Oxy-Methylene	聚缩醛
PP	Poly-Propylene (TP)	聚丙烯
PPA	Poly-Phthal-Amide	聚酞酸酯
PPE	Poly-Phenylene-Ether	聚苯醚
PPO	Poly-Phenylene-Oxide	聚氧化二甲苯
PPS	Poly-Phenylene-Sulfide	聚硫化苯
PS	Poly-Styrene (TP)	聚苯乙烯
PSF	Poly-Sulfone (TP)	聚砜
PTFE	Poly-Tetrafluoroethylene	聚四氟乙烯
PU	Poly-Urethane (TP)	聚氨基甲酸乙酯
PVC	Poly-Vinyl-Chloride (TP)	聚氯乙烯

续表

简 称	英 文	中 文
PVDC	Poly-Vinyl-Dichloride	聚二氯乙烯
PVDF	Poly-Vinylidene-Fluoride	聚偏二氟乙烯
SAN (AS)	Styrene-Acrylonitrile	苯乙烯-丙烯腈
SB	Styrene-Butadiene	苯乙烯-丁二烯
SMA	Styrene-Maleic-Anhydride	苯乙烯-马来酐
TPE	Thermo-Plastic-Elastomer	热塑性弹性体
TPO	Thermo-Plastic-Polyolefin	热塑性聚烯烃

#### 4. 电子设备常用塑料

##### (1) ABS

ABS 树脂是丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物，丙烯腈组分在 ABS 中表现的特性是耐热性、耐化学性、刚性、抗拉强度，丁二烯表现的特性是抗冲击强度，苯乙烯表现的特性是加工流动性、光泽性。这三组分的结合，优势互补，使 ABS 树脂具有优良的综合性能：刚性好，冲击强度高，耐热、耐低温、耐化学药品，机械强度和电气性能优良，易于加工，加工尺寸稳定性和表面光泽好，容易涂装着色，还可以进行喷涂金属、电镀、焊接和粘接等二次加工。

ABS 在家电和小家电中有着广泛的市场，如有些大屏幕电视机的前后壳体使用阻燃 ABS 制成。

美国通用公司推出 ABS/PBT 合金，与原有的 ABS/尼龙树脂相比，该合金吸湿性低，有较高的尺寸稳定性。GE 公司利用生产聚碳酸酯的优势，开发了 PC/ABS 合金，采用特殊的聚合工艺，使 ABS 具有较高的橡胶含量，从而提高了低温冲击性能。Monsanto 公司开发的第四代 ABS 树脂，具有高的熔融流动性和表面平整度，主要用于电子计算机软盘。

##### (2) ASA

ASA 是一种由丙烯腈 (Acrylonitrile)、苯乙烯 (Styrene)、丙烯酸橡胶 (Acrylate) 组成的于 20 世纪 70 年代研制成功的三元聚合物，属于抗冲改性树脂，具有较好的耐高温性能，是一种防静电材料，能使表面少积灰尘。ASA 的抗老化性能是 ABS 的 10 倍以上。

ASA 在电子电气领域被用于全天候耐用设备的外壳，如电话机、厨房设备、卫星天线等的壳体。

##### (3) 环氧树脂 (EP)

力学性能、电绝缘性、化学稳定性好，对许多材料的粘接力强。适于制作电工、电子元件及线圈的灌封与固定，还可用于修复。

##### (4) 有机硅塑料 (IS)

耐高低温，高频绝缘性好，耐辐射。适于制作电工、电子元件及线圈的灌封与固定。

##### (5) 液晶聚酯 (LCP)

流动性高，尺寸稳定性佳，机械强度高，难燃，与流动方向垂直之机械物性较差。适于制作开关、插座。

##### (6) 低密度聚乙烯 (LDPE)

低密度聚乙烯是高压下乙烯自由基聚合而获得的热塑性塑料，透明，化学惰性、密封能力好，易于成型加工。被用做电信电缆的外皮。

##### (7) 聚酰胺 (PA)

聚酰胺，又称尼龙 (Nylon)。它为韧性、半透明树脂，具有很高的机械强度，软化点高，耐热，耐油，耐弱酸，耐碱，摩擦系数低，耐磨损，自润滑性、消音性和电绝缘性好，无毒，无臭，

耐候性好,在 449~499℃时会发生自燃,有自熄性。尼龙的熔体流动性好,故制品壁厚可小到 1mm。缺点是染色性差,吸水性大(影响尺寸稳定性和电性能)。尼龙与玻璃纤维亲合性很好,纤维增强可降低树脂吸水率,使其能在高温、高湿下工作。

聚酰胺适于制作一般机械零件、耐磨零件、传动零件,具体介绍如下:

① 聚己内酰胺(PA6)。PA6 又称聚酰胺 6、尼龙 6。PA6 为乳白色或微黄色聚合物,可自由着色,韧性、耐磨性、自润滑性好,刚性小,耐低温,耐细菌,能慢燃,有滴落、起泡现象,离火慢熄。成型加工性极好:可注塑、吹塑、浇塑、喷涂、粉末成型、机加工、焊接、粘接。

PA6 是吸水率最高的 PA,尺寸稳定性差。PA6 最高使用温度可达 180℃,加抗冲改性剂后会降至 160℃,用 15%~50%玻璃纤维增强,可提高至 199℃。用于制作轴承、齿轮、凸轮、滚子、滑轮、辊轴、螺钉、垫片等。

② 聚酰胺 12(PA12 或尼龙 12)。PA12 是很好的电气绝缘体,有很好的抗冲击性、较低的熔点和密度,对强氧化性酸无抵抗能力。用于制作电缆套、机械凸轮、滑动机构以及轴承等。

③ 聚酰胺 66(PA66)。又称为尼龙 66,它由己二酸和己二胺通过缩聚反应制得,为半透明或不透明的乳白色结晶聚合物,受紫外光照射会发紫白色或蓝白色光,机械强度较高,耐应力开裂性好。是硬度、刚性、耐磨性最好的 PA,但韧性最差。自润滑性优良,仅次于聚四氟乙烯和聚甲醛,耐热性也较好,属自熄性材料,化学稳定性好,尤其耐油性极佳,但易溶于苯酚、甲酸等极性溶剂。吸水性大,因而尺寸稳定性差。

成型加工性好,可注塑、挤出、吹塑、喷涂、浇铸成型、机械加工、焊接、粘接。用途与尼龙 6 基本一样,还可制作把手、壳体、支撑架等。

④ 尼龙 1010。它是半透明、轻而硬、表面光亮的结晶型白色或微黄色颗粒,机械强度高,冲击韧性、耐磨性和自润滑性好。熔体流动性好,易于成型加工,但熔体温度范围较窄。尼龙 1010 还具有较好的电气绝缘性和化学稳定性,无毒。不溶于大部分非极性溶剂,如烃、脂类、低级醇等,但溶解于强极性溶剂,如苯酚、浓硫酸、甲酸、水合三氯乙醛等。耐霉菌、细菌和虫蛀。

用于制作轴承架、轴套、电线电缆护套等。

#### (8) 聚酰胺酰亚胺(PAI)

耐老化、蠕变,耐燃,耐油,耐化学药品,耐放射线。不易成型,离行性亦差。用于制作插座、连接器、开关类零件、IC 电路盘、复印机、电热器零件。

#### (9) PAR 塑料(U 塑料)

为透明无定形热塑性工程塑料,具有优良的耐热性、阻燃性和无毒性。适于制作耐热、耐燃和尺寸稳定性高的电器零件,如连接器、线圈架、继电器外壳。

#### (10) 聚对苯二甲酸二丁酯(PBT)

PBT 为乳白色结晶型热塑性聚酯,具有高耐热性、韧性、耐疲劳性,吸水率仅为 0.1%,在潮湿环境中仍保持各种物性(包括电性能)。耐碱类、酸类、油类,低温下可迅速结晶,成型性良好。缺点是成型收缩率大。采用玻璃纤维增强或无机填充改性,其拉伸强度、弯曲强度可提高 1 倍以上,热变形温度也大幅提高,可以在 140℃温度环境中长期工作。

增强、改性 PBT 主要用于制作点火器线圈骨架、绝缘盖、摩托车点火器、显像管和电位器支架、变压器骨架、开关接插件、电动机端盖、电熨斗罩、水银灯罩、烘烤炉部件、电动工具零件、屏蔽套等。

#### (11) 聚碳酸酯(PC)

PC 是一种无定型、无臭、无毒、高度透明的无色或微黄色热塑性工程塑料,具有优良的物理机械性能,尤其是耐冲击性优异,拉伸强度、弯曲强度、压缩强度高;蠕变性小,尺寸稳定;

可在-60~120℃环境中长期使用；无明显熔点，在220~230℃呈熔融状态；由于分子链刚性大，树脂熔体黏度大；吸水率小，收缩率小，尺寸精度高，尺寸稳定性好，薄膜透气性小；属自熄性材料；耐油、耐酸，不耐强碱，溶于氯化烃类和芳香族溶剂，长期在水中易引起水解和开裂，抗疲劳强度差，容易产生应力开裂，耐磨性欠佳。

PC 可用于制作低载荷零件，如汽油泵表盘、汽车仪表板、接线盒、插座、插头及套管、垫片、电话线路支架下通信电缆的连接件、电闸盒、配电盘组件、继电器外壳。

#### (12) PC/ABS

具有 PC 和 ABS 两者的综合特性，如易加工特性、优良机械特性和热稳定性、优异的流动特性。用于制作计算机壳体、电气设备零件。

#### (13) PC/PBT

具有 PC 和 PBT 二者的综合特性，如高韧性、几何稳定性、化学稳定性、热稳定性和润滑特性等。用于制作齿轮箱以及要求具有抗化学反应和耐腐蚀性、热稳定性、抗冲击性以及几何稳定性的产品。

#### (14) 聚乙烯 (PE)

耐腐蚀性、电绝缘性（尤其是高频绝缘性）优良，刚性、硬度和强度较高，吸水性小，有良好的电性能和耐辐射性；高压聚乙烯的柔软性、伸长率、冲击强度和渗透性较好；超高分子量聚乙烯冲击强度高、耐疲劳、耐磨。

低压聚乙烯适于制作耐腐蚀零件和绝缘零件；高压聚乙烯适于制作薄膜等；超高分子量聚乙烯适于制作减振、耐磨及传动零件。

#### (15) 聚醚酮 (PEEK)

在所有工程塑料中其耐热性最高，耐放射，耐药品，难燃。结晶化温度高，速度慢。用于制作离合器零件、复印机零件、高温用连接器、可挠性印制电路板。

#### (16) 聚醚酰亚胺 (PEI)

聚醚酰亚胺具有优良的机械性能、电绝缘性能、耐高低温及耐磨性能，可在-160~180℃使用。在电器、电子工业部门，聚醚酰亚胺材料制造的零部件获得了广泛的应用，包括强度高和尺寸稳定的连接件、普通和微型继电器外壳、电路板、线圈、软性电路、反射镜、高精度光纤元件。特别是用它取代金属制造光纤连接器，可使元件结构最佳化，简化其制造和装配步骤，保持更精确的尺寸，从而保证最终产品的成本降低约40%。

PEI 是优良的涂层和成膜材料，能形成适用于电子工业的涂层和薄膜，可用于制造高渗透性的微孔隔膜，还可用作耐高温胶粘剂和高强度纤维等。

#### (17) 聚醚砜 (PES)

聚醚砜具有出色的氧化稳定性，透明，耐应力开裂，耐水解，耐绝大多数酸、碱、酯类碳氢化合物、醇、油及脂类。聚醚砜具有宽温度范围内-100~200℃的高机械性能。

由于 PES 制品长期使用温度达180℃，属UL94V-0级材料，具有高尺寸稳定性能、良好的电绝缘性能，因而使其成为电气工程结构材料的首选材料。PES 制品主要包括线圈骨架、接触器、二维及三维空间结构的印制电路板、开关零件、灯架基座、蓄电池外罩等。

#### (18) 饱和聚酯对苯二甲酸乙酯 (PET)

PET 是乳白色或浅黄色、高度结晶的聚合物，表面平滑有光泽。在较宽的温度范围内具有优良的物理机械性能，耐有机溶剂，长期使用温度可达120℃，电绝缘性优良，抗蠕变性、耐疲劳性、耐摩擦性、尺寸稳定性都很好。缺点是结晶速率慢，成型加工困难，模塑温度高，生产周期长，冲击性能差。为改进 PET 性能，PET 可与 PC、弹性体、PBT、PS 类、ABS、PA 形成合金。

主要应用：电气插座、电子连接器、电饭煲把手、断路器外壳、开关、电动机风扇外壳、仪表机械零件、点钞机零件、电磁灶的配件、流量控制阀、化油器盖、配电盘罩、灯罩外壳、照明器外壳。

#### (19) PFA 塑料

PEA 塑料对所有化学品都耐腐蚀，摩擦系数在塑料中最低，还有很好的电性能，其电绝缘性不受温度影响，有“塑料王”之称。拉伸强度高，伸长率可达 100%~300%；介电性好，耐辐射性能优异；阻燃性达 V0 级。

适于制作耐腐蚀件、耐磨件、密封件、高温电缆绝缘层。

#### (20) 聚酰亚胺 (PI)

聚酰亚胺以其优异的电绝缘性、耐磨性、抗高温、抗辐射和物理机械性能，广泛用于机电、电子、电气、仪表计量等领域，已成为全球火箭、宇航等尖端科技领域不可缺少的材料之一。

#### (21) PMMA 塑料 (有机玻璃)

PMMA 塑料，具有较好的抗冲击特性、优良的光学特性及耐气候变化特性，白光的穿透性高达 92%。具有室温蠕变特性，随着负荷加大、时间增长，可导致应力开裂现象。适于制作信号灯设备、仪表盘、影碟、灯光散射器等。

#### (22) 聚甲醛 (POM)

POM 为乳白色不透明结晶性树脂，具有良好的综合性能和着色性，具有较高的弹性模量、很高的刚性和硬度；拉伸强度、弯曲强度、耐蠕变性和耐疲劳性优异，耐反复冲击，去载回复性优；摩擦系数小，耐磨耗，尺寸稳定性好，表面光泽好，有较高的粘弹性，电绝缘性优，且不受温度、湿度影响；除了强酸、酚类和有机卤化物外，对其他化学品稳定，耐油；机械性能受温度影响小，具有较高的热变形温度。缺点是阻燃性较差，遇火徐徐燃烧，另外，耐候性不理想，室外应用要添加稳定剂。

POM 强度高、质轻，常用来代替铜、锌、锡、铅等有色金属，被广泛用于制造各种滑动、转动机械零件，做各种齿轮、杠杆、滑轮、链轮，特别适宜做轴承、电子开关零件、紧固体、接线柱镜面罩、电风扇零件、加热板、仪表钮。

#### (23) 聚丙烯 (PP)

共聚物型的 PP 材料有较低的热扭曲温度、低透明度、低光泽度、低刚性，强度随着乙烯含量的增加而增大。由于结晶度较高，这种材料的表面刚度和抗划痕特性很好。PP 不存在环境应力开裂问题。通常采用加入玻璃纤维、金属添加剂或热塑橡胶的方法对 PP 进行改性。均聚物型和共聚物型的 PP 材料都具有优良的抗吸湿性、抗酸碱腐蚀性、抗溶解性，但对芳香烃（如苯）溶剂、氯化烃（四氯化碳）溶剂等没有抵抗力。

典型应用：洗碗机门衬垫、干燥机通风管、洗衣机框架及机盖、冰箱门衬垫等。

#### (24) PPE 聚丙烯

PPE 聚丙烯的吸湿性很小，具有优良的电绝缘特性和很低的热膨胀系数。其制品具有优良的几何稳定性。

典型应用：洗碗机、洗衣机控制器壳体、光纤连接器等。

#### (25) 聚苯醚 (PPO)

PPO 无毒、透明、相对密度小，具有优良的机械强度、耐蠕变性、耐热性、耐水性、尺寸稳定性。在很宽温度、频率范围内电性能好，不水解、成型收缩率小，难燃，有自熄性，易溶胀或应力开裂，熔融流动性差，加工成型困难。

用聚苯乙烯或其他聚合物改性的聚苯醚，简称 MPPO。利用 MPPO 耐热性、耐冲击性、尺寸

稳定性、耐擦伤、耐剥落、可涂性和电气性能，用于做散热器格子、扬声器格栅、控制台、保险盒、继电器箱、连接器、轮罩、线圈绕线轴、开关继电器、调谐设备、大型电子显示器、可变电容器、蓄电池配件、家用电器等外装件和组件。

#### (26) 聚硫化二甲苯 (PPS)

PPS 是结晶型（结晶度 55%~65%）的高刚性白色粉末聚合物，耐热性高（连续使用温度达 240℃），机械强度、刚性、耐化学药品性、尺寸稳定性都优良，耐磨，抗蠕变性优，阻燃性优。高温、高湿下仍保持良好的电性能。流动性好，易成型，成型时几乎没有缩孔凹斑。与各种无机填料有良好的亲和性。增强改性后可提高其物理机械性能和耐热性（热变形温度），增强材料有玻璃纤维、碳纤维、聚芳酰胺纤维、金属纤维等，以玻璃纤维为主。无机填充料有滑石、高岭土、碳酸钙、二氧化硅、二硫化钼等。

玻璃纤维增强 PPS 具有优异的热稳定性、耐磨性、抗蠕变性，在宽范围（温度、湿度、频率）内有极佳的机械性能和电性能，介电损耗低。作为耐高温、防腐涂料，可以在 180℃ 温度环境长期使用；电子电气工业上作为连接器、绝缘隔板、端子、开关、传感器部件。

#### (27) 聚苯乙烯 (PS)

PS 具有非常好的几何稳定性、热稳定性、光学透过特性、电绝缘特性。它能够抵抗水、稀释的无机酸，但能够被强氧化酸如浓硫酸所腐蚀，并且能够在一些有机溶剂中膨胀变形。

PS 聚苯乙烯典型应用：产品包装、光源散射器、绝缘薄膜等。

#### (28) 聚砜 (PSF)

PSF 力学性能优异，刚性大，耐磨，高强度，即使在高温下也保持优良的机械性能是其突出的优点，长期使用温度为 160℃，短期使用温度为 190℃，耐水解，尺寸稳定性好，成型收缩率小，无毒，耐辐射，耐燃。在宽广的温度和频率范围内有优良的电性能。化学稳定性好，除浓硝酸、浓硫酸、卤代烃外，能耐一般酸、碱、盐。缺点主要是耐疲劳强度差、耐紫外线和耐候性较差。

适于制作耐热件、绝缘件、耐磨件、仪器仪表零件、集成线路板、线圈管架、接触器、套架、电容薄膜、高性能碱电池外壳等。也可代替有色金属用于复印机、照相机等的精密结构件。

#### (29) PTFE 塑料 (F4)

PTFE 塑料结晶度越高，透明性就越差。对所有化学品都耐腐蚀，摩擦系数在塑料中最低，其电绝缘性不受温度影响。适于制作耐腐蚀件、耐磨件、密封件、绝缘件。

#### (30) 聚氯乙烯 (PVC)

PVC 材料具有不易燃性、高强度、耐气候变化性以及优良的几何稳定性，对氧化剂、还原剂和强酸都有很强的抵抗力。

PVC 的典型应用有机器壳体、电子产品包装等。

#### (31) 酚醛塑料

酚醛塑料是一种硬而脆的热固性塑料，俗称电木粉。机械强度高，坚韧耐磨，尺寸稳定，耐腐蚀，电绝缘性能优异。适于制作电器、仪表的绝缘机构件，可在湿热条件下使用。

#### (32) 氨基塑料

氨基塑料耐电弧性和电绝缘性良好，耐水、耐热性较好，适于压缩成型。适于制作耐电弧的电工零件和防爆电器绝缘件。

### 1.2.3.3 橡胶

橡胶，同塑料、纤维并称为三大合成材料。橡胶的最大特征，一是弹性模量非常小，而伸长率很



高，耐各种弯曲变形。二是它具有相当好的耐透气性以及耐各种化学介质和电绝缘的性能。某些特种合成橡胶更具备良好的耐油性及耐温性，能抵抗脂肪油、润滑油、液压油、燃料油以及溶剂油的溶胀；耐寒可低到-60~-80℃，耐热可高到 180~350℃。三是在于它能与多种材料并用、共混与复合，由此进行改性，以得到良好的综合性能。

1. 橡胶的分类（见表 1-6）

表 1-6 橡胶的分类

分 类 方 法	分 类 名 称	分 类 说 明
橡 胶 的 来 源	天然橡胶	它是采集橡胶树或橡胶草等含胶植物中的胶汁，经过去杂质、凝聚、液压、干燥等加工步骤而制成的，其主要化学组成成分是不饱和橡胶烃
	合成橡胶	它是从石油、天然气或煤和石灰石以及农副产品中（现在主要是从石油化工产品中）提炼某些低分子的不饱和烃作原料，制成“单体”物质，然后经过复杂的化学反应而获得的人工合成的高分子聚合物，故有人造橡胶之称。合成橡胶的种类很多，现在已经工业化生产的有：丁苯橡胶、顺丁橡胶、异戊橡胶、氯丁橡胶、丁基橡胶、丁腈橡胶、丁丙橡胶、氯磺化聚乙烯橡胶、丙烯酸酯橡胶、聚氨酯橡胶、硅橡胶、氟橡胶、氯醚橡胶、以及聚硫橡胶等
橡 胶 的 性 能 和 用 途	通用橡胶	它是指产量大、应用广、在使用上一般无特殊性能要求的通用橡胶而言，主要有天然橡胶、丁苯橡胶、丁腈橡胶、顺丁橡胶、异戊橡胶、氯丁橡胶、丁基橡胶 7 大品种
	特种橡胶	它是指用于特殊用途中，如耐油、耐酸碱、耐高温、耐低温、耐辐射等橡胶而言，主要有乙丙橡胶、氯磺化聚乙烯橡胶、氯化聚乙烯橡胶、丙烯酸酯橡胶、聚氨酯橡胶、硅橡胶、氟橡胶、氯醚橡胶、聚硫橡胶等
橡 胶 的 物 理 形 态	生橡胶	简称生胶，是指由天然采集、提炼或人工合成、未加配合剂而制成的原始胶料，为较硬的大块。生胶是一种不饱和的橡胶烃，未经配合的生胶性能较差，不能直接使用
	软橡胶	是指在生胶中加入各种配合剂，经过塑炼、混炼、硫化等加工过程而制成为具有高弹性、高强度和其他实用性能的橡胶产品。一般所谓的橡胶就是这种软橡胶。根据各种工业制品的需要，软橡胶可用不同性能的天然或合成生橡胶，加入各种不同比率的配合剂，就可以制成不同硬度和具有特殊性能的橡胶制品
	硬橡胶	又称硬质橡胶，它与软橡胶的不同之处是含有大量硫磺（25%~50%）的生胶经过硫化而制成的硬质制品。这种橡胶具有较高的硬度和强度，优良的电气绝缘性以及某些酸、碱和溶剂的高度稳定性。广泛用于制作电绝缘制品和耐化学腐蚀制品
	混炼胶	它是指在生胶中加入各种配合剂，经过炼胶机的混合作用后，使其具有所需要物理机械性能的半成品，俗称胶料。通常均作为商品出售，购买者可直接用它加工、硫化压制成所需要的橡胶制品，不需要再配制胶料，混炼胶有不同的品种和牌号
	再生胶	再生胶是以废轮胎和其他废旧橡胶制品为原料，经过一定的加工过程而制成的具有一定塑性的循环可利用橡胶。它是橡胶工业中的主要原料之一，可以部分地代替生胶，节约生胶

在工业使用上，按橡胶的外观形态，橡胶可分为固态橡胶（又称干胶）、乳状橡胶（简称乳胶）、液体橡胶和粉末橡胶四大类。按耐热及耐油等功能分为普通橡胶、耐热橡胶、耐油橡胶以及耐天候老化橡胶、耐特种化学介质橡胶等。按橡胶的软硬程度划分为一般橡胶、硬橡胶、半硬质胶、硬质胶、微孔胶、海绵胶、泡沫橡胶等。

2. 常用橡胶的品种、特性和用途（见表 1-7）

表 1-7 常用橡胶的品种、特性和用途

橡 胶 品 种	化 学 组 成	性 能 特 点	主 要 用 途
天然橡胶（NR）	以橡胶烃（聚异戊二烯）为主，含少量蛋白质、水分、树脂酸、糖类和无机盐等	弹性大，定伸强度高，抗撕裂性和电绝缘性优良，耐磨性和耐旱性良好，加工性佳，易于其他材料黏合，在综合性能方面优于多数合成橡胶。缺点是耐氧和耐臭氧性差，容易老化变质；耐油和耐溶剂性不好，抵抗酸碱腐蚀的能力低；耐热性不高。使用温度范围：-60~80℃	制作轮胎、胶鞋、胶管、胶带、电线电缆的绝缘层和护套以及其他通用制品。特别适用于制造扭振消除器、发动机减振器、机器支座、橡胶—金属悬挂元件、膜片、模压制品
丁苯橡胶（SBR）	丁二烯和苯乙烯的共聚体	性能接近天然橡胶，是目前产量最大的通用合成橡胶，其特点是耐磨性、耐老化和耐热性超过天然橡胶，质地也较天然橡胶均匀。缺点是：弹性较低，抗屈挠、抗撕裂性能较差；加工性能差，特别是自黏性差、生胶强度低。使用温度范围：-50~100℃	代替天然橡胶制作轮胎、胶板、胶管、胶鞋及其他通用制品

续表

橡 胶 品 种	化 学 组 成	性 能 特 点	主 要 用 途
顺丁橡胶 (BR)	丁二烯聚合而成的顺式结构橡胶	弹性与耐磨性优良, 耐老化性好, 耐低温性优异, 在动态负荷下发热量小, 易与金属黏合。缺点是强度较低, 抗撕裂性差, 加工性能与自黏性差。使用温度范围: $-60\sim 100^{\circ}\text{C}$	一般多和天然橡胶或丁苯橡胶并用, 主要制作轮胎胎面、运输带和特殊耐寒制品
异戊橡胶 (IR)	异戊二烯单体聚合而成的一种顺式结构橡胶	化学组成、立体结构与天然橡胶相似, 性能也非常接近天然橡胶, 故有合成天然橡胶之称。它具有天然橡胶的大部分优点, 耐老化优于天然橡胶, 弹性和强力比天然橡胶稍低, 加工性能差, 成本较高。使用温度范围: $-50\sim 100^{\circ}\text{C}$	可代替天然橡胶制作轮胎、胶鞋、胶管、胶带以及其他通用制品
氯丁橡胶 (CR)	氯丁二烯作单体乳液聚合而成的聚合物	这种橡胶分子中含有氯原子, 所以与其他通用橡胶相比: 它具有优良的抗氧、抗臭氧性, 不易燃, 着火后能自熄, 耐油、耐溶剂、耐酸碱以及耐老化、气密性好等优点; 其物理机械性能也比天然橡胶好, 故可用做通用橡胶, 也可用做特种橡胶。主要缺点是耐寒性较差, 密度较大、相对成本高, 电绝缘性不好, 加工时易粘滚、易焦烧及易粘模。此外, 生胶稳定性差, 不易保存。使用温度范围: $-45\sim 100^{\circ}\text{C}$	主要用于制造要求抗臭氧、耐老化性高的电缆护套及各种防护套、保护罩; 耐油、耐化学腐蚀的胶管、胶带和化工衬里; 耐燃的地下采矿用橡胶制品, 以及各种模压制品、密封圈、垫、黏结剂等
丁基橡胶 (IIR)	异丁烯和少量异戊二烯或丁二烯的共聚体	气密性好, 耐臭氧、耐老化性能好, 耐热性较高, 长期工作温度可在 $130^{\circ}\text{C}$ 以下; 能耐无机强酸 (如硫酸、硝酸等) 和一般有机溶剂, 吸振和阻尼特性良好, 电绝缘性也非常好。缺点是弹性差, 加工性能差, 硫化速度慢, 黏着性和耐油性差。使用温度范围: $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$	主要用做内胎、水胎、气球、电线电缆绝缘层、化工设备衬里及防震制品、耐热运输带、耐老化的胶布制品
丁腈橡胶 (NBR)	丁二烯和丙烯腈的共聚体	耐汽油和脂肪烃油类的性能特别好, 仅次于聚硫橡胶、丙烯酸酯和氟橡胶, 而优于其他通用橡胶。耐热性好, 气密性、耐磨及耐水性等均较好, 黏结力强。缺点是耐寒及耐臭氧性较差, 强力及弹性较低, 耐酸性差, 电绝缘性不好, 耐极性溶剂性能也较差。使用温度范围: $-30\sim 100^{\circ}\text{C}$	主要用于制造各种耐油制品, 如胶管、密封制品等
氢化丁腈橡胶 (HNBR)	丁二烯和丙烯腈的共聚体	它是通过全部或部分氢化 NBR 的丁二烯中的双键而得到的。其特点是机械强度和耐磨性高, 用过氧化物交联时耐热性比 NBR 好, 其他性能与丁腈橡胶一样。缺点是价格较高。使用温度范围: $-30\sim 150^{\circ}\text{C}$	主要用于耐油、耐高温的密封制品
乙丙橡胶 (EPM/EPDM)	乙烯和丙烯的共聚体, 一般分为二元乙丙橡胶和三元乙丙橡胶	特点是抗臭氧、耐紫外线、耐气候性和耐老化性优异, 居通用橡胶之首。电绝缘性、耐化学性、冲击弹性很好, 耐酸碱, 密度小, 可进行高填充配合。耐热可达 $150^{\circ}\text{C}$ , 耐极性溶剂——酮、酯等, 但不耐脂肪烃和芳香烃, 其他物理机械性能略次于天然橡胶而优于丁苯橡胶。缺点是自黏性和互黏性很差, 不易黏合。使用温度范围: $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$	主要用做化工设备衬里、电线电缆包皮、蒸汽胶管、耐热运输带、汽车用橡胶制品及其他工业制品
硅橡胶 (Q)	主链含有硅、氧原子的特种橡胶, 其中起主要作用的是硅元素	其主要特点是既耐高温 (最高 $300^{\circ}\text{C}$ ) 又耐低温 (最低 $-100^{\circ}\text{C}$ ), 是目前最好的耐寒、耐高温橡胶; 同时电绝缘性优良, 对热氧化和臭氧的稳定性很高, 化学惰性大。缺点是机械强度较低, 耐油、耐溶剂和耐酸碱性能差, 较难硫化, 价格较贵。使用温度: $-60\sim 200^{\circ}\text{C}$	主要用于制作耐高低温制品 (胶管、密封件等)、耐高温电线电缆绝缘层, 由于其无毒无味, 还用于食品加工及医疗行业

续表

橡 胶 品 种	化 学 组 成	性 能 特 点	主 要 用 途
氟橡胶 (FPM)	含氟单体共聚而成的有机弹性体	其特点耐高温可达 300℃, 耐酸碱, 耐油性是耐油橡胶中最好的, 抗辐射、耐高真空性能好; 电绝缘性、机械性能、耐化学腐蚀性、耐臭氧、耐空气老化性均优良。缺点是加工性差, 价格昂贵耐寒性差, 弹性透气性较低。使用温度范围: -20~+200℃	主要用于国防工业, 如制造飞机、火箭上的耐真空、耐高温、耐化学腐蚀的密封材料、胶管或其他零件及汽车工业
聚氨酯橡胶 (AU/EU)	聚酯(或聚醚)与二异氰酸酯类化合物聚合而成的弹性体	其特点是耐磨性好, 在各种橡胶中是最好的; 强度高、弹性好、耐油性优良。耐臭氧、耐老化、气密性等也优异。缺点是耐温性能较差, 耐水和耐碱性差, 耐芳香烃、氯化烃及酮、酯、醇类等溶剂性较差。使用温度范围: -30~80℃	制作轮胎紧挨由零件、垫圈、防震制品, 以及耐磨、高强度和耐油的橡胶制品
丙烯酸酯橡胶 (ACM/AEM)	丙烯酸乙酯或丙烯酸丁酯的聚合物	其特点是兼有良好的耐热、耐油性能, 在含有硫、磷、氯添加剂的润滑油中性能稳定。同时耐老化、耐氧和臭氧、耐紫外线、气密性优良。缺点是耐寒性差, 不耐水, 不耐蒸汽及有机和无机酸、碱。在甲醇、乙二醇、酯类等水溶性溶液内膨胀严重。同时, 弹性和耐磨性差, 电绝缘性差, 加工性能较差。使用温度范围: -25~150℃	可用于制造耐油、耐热、耐老化的制品, 如密封件、胶管、化工衬里等
氯磺化聚乙烯橡胶 (CSM)	聚乙烯经氯化化和磺化处理后, 所得到的具有弹性的聚合物	耐臭氧及空气老化性能优良, 耐候性优于其他橡胶。阻燃、耐热、耐溶剂性及耐大多数化学药品和耐酸碱性能较好。电绝缘性尚可, 耐磨性与丁苯橡胶相似。缺点是抗撕裂性能差, 加工性能不好。使用温度范围: -20~120℃	可用做臭氧发生器上的密封材料, 制造耐油密封件、电线电缆包皮以及耐油橡胶制品和化工衬里
氯醚橡胶 (CO/ECO)	环氧氯丙烷与环氧乙烷共聚而成的聚合物	特点是耐脂肪烃及氯化烃溶剂、耐碱、耐水、耐老化性能极好, 耐臭氧性、耐候性、耐热性、气密性高。缺点是强力较低、弹性较差、电绝缘性不良。使用温度范围: -40~140℃	可用做胶管、密封件、薄膜和容器衬里、油箱、胶辊, 制造油封、水封等
氯化聚乙烯橡胶 (CM 或 CPE)	聚乙烯通过氯取代反应制成的具有弹性的聚合物	性能与氯磺化聚乙烯橡胶接近, 其特点是流动性好, 容易加工; 有优良的耐气候性、耐臭氧性和耐电晕性, 耐热、耐酸碱、耐油性良好。缺点是弹性差、压缩变形较大, 电绝缘性较低。使用温度范围: -20~120℃	电线电缆护套、胶管、胶带、胶辊化工衬里等

### 3. 橡胶工业制品的种类

#### (1) 橡胶密封制品

橡胶密封制品包括 O 型橡胶密封圈、旋转轴唇形密封件(油封)、复合密封、异形断面橡胶密封件、制动皮碗皮圈、汽车制动气室橡胶隔膜、橡胶密封条、橡胶防尘套(罩)、皮膜、水封制品、吸水膨胀橡胶、桥面橡胶伸缩缝等。

#### (2) 橡胶减振制品

橡胶减振制品包括橡胶减振器、橡胶气弹簧、橡胶弹性联轴节、可屈挠橡胶接头、橡胶护舷、汽车用橡胶减振器、火车机车用橡胶减振器、橡胶轨枕垫、桥梁橡胶支座等。

#### (3) 其他

硬质橡胶、橡胶海绵制品、胶板与防水卷材、胶辊、纺织用橡胶制品、印刷工业用橡胶制品、橡胶衬里、橡胶电绝缘制品、软木橡胶。

### 1.2.3.4 导线

导线是能够导电的金属线, 是电能的传输载体。工业及民用导线有好几百种, 有些导线线径

细得像头发丝,有些线径粗得如金属棒,这里仅介绍电子设备生产中常用的电线电缆和电磁线。

## 1. 导线的分类和组成

### (1) 导线的分类

电子设备中常用的导线包括电线与电缆,又能细分成裸线、电磁线、绝缘电线电缆和通信电缆四类。裸线是指没有绝缘层的单股或多股导线,大部分作为电线电缆的线芯,少部分直接用在电子设备中连接电路。电磁线是有绝缘层的导线,绝缘方式有表面涂漆或外缠纱、丝、薄膜等,一般用来绕制电感类产品的绕组,所以也叫做绕组线。绝缘电线电缆包括固定敷设电线、绝缘软电线和屏蔽线,用做电子设备的电气连接。通信电缆包括用在电信系统中的电信电缆、高频电缆和双绞线。电信电缆一般是成对的对称多芯电缆,通常用于工作频率在几百千赫以下的信号传输;高频电缆对高频信号传输损耗小,效率高。双绞线用在计算机和电信信号的传输,频率在 10MHz 至几百兆赫。

### (2) 导线一般由导体芯线和绝缘体外皮组成(裸线除外)

① 导体材料。导体材料主要是导电性能好的铜线和铝线,大多制成圆形截面,少数根据特殊要求制成矩形或其他形状的截面。对于电子设备来说,几乎都是使用铜线。纯铜线的表面很容易氧化,一般导线是在铜线表面镀抗氧化金属。此外,普通导线镀锡能提高可焊性;镀银能提高高频电性能;镀镍能提高耐热性能;后两种导线的成本较高,使用不如镀锡导线普遍。

导线的粗细标准称为线规,有线号和线径两种表示方法:按导线的粗细排列成一定号码的叫做线号制,线号越大,其线径越小,英、美等国家采用线号制;线径制则是用导线直径的毫米(mm)数表示线规,中国采用线径制。

### ② 绝缘外皮材料。

导线绝缘外皮材料主要有塑料类(聚氯乙烯、聚四氟乙烯等)、橡胶类、纤维类(棉、化纤等)、涂料类(聚酯、聚乙烯漆)。它们可以单独构成导线的绝缘外皮,也能组合使用。常见的塑料导线、橡皮导线、纱包线、漆包线等,就是以外皮材料区分的。

导线绝缘外皮的作用,除了电气绝缘、能够耐受一定电压以外,还有增强导线机械强度、保护导线不受外界环境腐蚀的作用。

## 2. 安装导线、屏蔽线

在电子设备生产中常用的安装导线,主要是塑料线。常用几种安装导线的外观如图 1-1 所示,

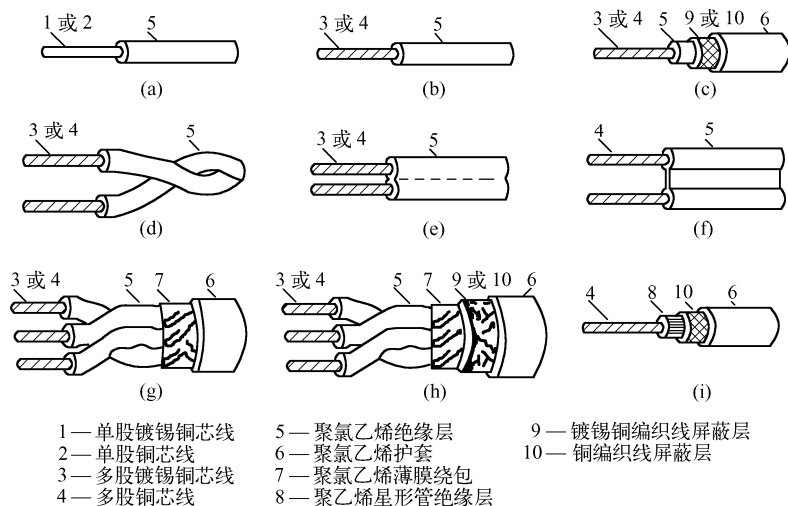


图 1-1 常用安装导线

其型号、名称及用途见表 1-8。其中有屏蔽层的导线称为屏蔽线，如图 1-1（c）、图 1-1（h）所示。屏蔽线能够实现静电（或高电压）屏蔽、电磁屏蔽和磁屏蔽的效果。屏蔽线有单芯、双芯和多芯等数种，一般用在工作频率为 1MHz 以下的场合。

选择使用安装导线，要注意以下几点：

（1）安全载流量 表 1-9 中列出的安全载流量，是铜芯导线在环境温度为 25℃、载流芯温度为 70℃的条件下架空敷设的载流量。当导线在机壳内、套管内等散热条件不良的情况下，载流量应该打折扣，取表中数据的 1/2 是可行的。一般情况下，载流量可按 5A/mm<sup>2</sup> 估算，这在各种条件下都是安全的。

表 1-8 常用安装导线

型 号	名 称	工 作 条 件	主 要 用 途	结 构 与 外 形
AV, BV	聚氯乙烯绝缘安装线	250V/AC 或 500V/DC, -60~+70℃	弱电仪器仪表、电信设备, 电气设备和照明装置	图 1-1 (a)
AVR, BVR	聚氯乙烯绝缘安装软电线	250V/AC 或 500V/DC, -60~+70℃	弱电仪器仪表、电信设备要求柔软导线的场合	图 1-1 (b)
SYV	聚氯乙烯绝缘同轴射频电缆	-40~+60℃	固定式无线电装置 (50Ω)	图 1-1 (c)
RVS	聚氯乙烯绝缘双绞线	450V 或 750V/AC, <50℃	家用电器、小型电动工具, 仪器仪表、照明装置	图 1-1 (d)
RVB	聚氯乙烯绝缘平行软线	450V 或 750V/AC, <50℃	家用电器、小型电动工具, 仪器仪表、照明装置	图 1-1 (e)
SBVD	聚氯乙烯绝缘双绞线	-40~+60℃	电视接收天线馈线 (300Ω)	图 1-1 (f)
AVV	聚氯乙烯绝缘安装电缆	250V/AC 或 500V/DC, -40~+60℃	弱电仪器仪表、电信设备	图 1-1 (g)
AVRP	聚氯乙烯绝缘屏蔽安装电缆	250V/AC 或 500V/DC, -60~+70℃	弱电仪器仪表、电信设备	图 1-1 (h)
SIV-7	空气-聚氯乙烯绝缘同轴射频电缆	-40~+60℃	固定式无线电装置 (75Ω)	图 1-1 (i)

表 1-9 铜芯导线的安全载流量 (25℃)

截面积 (mm <sup>2</sup> )	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.5	4.0	6.0	8.0	10.0
载流量 (A)	4	6	8	10	12	14	17	20	25	45	56	70	85

（2）最高耐压和绝缘性能 随着所加电压的升高，导线绝缘层的绝缘电阻将会下降；如果电压过高，就会导致放电击穿。导线标志的试验电压，是表示导线加电 1min 不发生放电现象的耐压特性。实际使用中，工作电压应该为试验电压的 1/3~1/5。

（3）导线颜色 塑料安装导线有棕、红、橙、黄、绿、蓝、紫、灰、白、黑等各种单色导线，还有在基色底上带一种或两种颜色花纹的花色导线。为了便于在电路中区分使用，习惯上经常选择的导线颜色见表 1-10。

表 1-10 安装导线的颜色

电 路 种 类		导 线 颜 色
三相交流电路	A 相	红
	B 相	绿
	C 相	蓝
	零线或中性线	淡蓝
	安全接地	绿底黄纹
一般交流电路		① 白② 灰
接地线路		① 绿② 绿底黄纹

续表

电 路 种 类		导 线 颜 色
直流线路	+	① 红② 棕
	GND	① 黑② 紫
	—	① 青② 白底青纹
晶体管电极	E 极	① 红② 棕
	B 极	① 黄② 橙
	C 极	① 青② 绿
指示灯		青
立体声电路	右声道	① 红② 橙
	左声道	① 白② 灰
有号码的接线端子		1~10 单色无花纹（10 是黑色），11~99 基色有花纹

（4）工作环境条件 室温和电子设备机壳内部空间的温度不能超过导线绝缘层的耐热温度；当导线（特别是电源线）受到机械力作用时，要考虑它的机械强度。对于抗拉强度、抗反复弯曲强度、剪切强度及耐磨性等指标，都应该在选择导线的种类、规格及连线操作、产品运输等方面考虑留有充分的余量。

（5）要便于连线操作 应该选择使用便于连线操作的安装导线。例如，带丝包绝缘层的导线用普通剥线钳很难剥出端头，如果不是机械强度的需要，不要选择这种导线作为普通连线。

3. 电磁线

电磁线是具有绝缘层的导电金属线，用来绕制电工、电子设备的线圈或绕组。其作用是实现电能和磁能转换：当电流通过时产生磁场；或者在磁场中切割磁力线产生电流。电磁线包括通常所说的漆包线和高频漆包线。表 1-11 中列出了常用电磁线的型号、特点及用途。

表 1-11 常用电磁线的型号、特点及用途

型 号	名 称	线径规格 $\phi$ (mm)	主 要 特 点	用 途
QQ	高强度聚乙烯醇缩醛漆包圆铜线	0.06~2.44	机械强度高,电气性能好	电动机、变压器绕组
QZ	高强度聚酯漆包圆铜线	0.06~2.44	同 QQ 型,且耐热 130℃,抗溶剂性能好	耐热要求 B 级的电动机、变压器绕组
QSR	单丝(人造丝)漆包圆铜线	0.05~2.10	工作温度范围达-60~+125℃	小型电动机、电器和仪表绕组
QZB	高强度聚酯漆包扁铜线	( 2.00 ~ 10.00 ) × (0.2~2.83)	绕线满槽率高	同 QZ 型,用于大型线圈绕组
QJST	单丝包绞合漆包高频电磁线	0.05~0.20	高频性能好	高频线圈、变压器的绕组

在生产电子设备时，经常要使用电磁线绕制高频振荡电路中的电感线圈。在模具或骨架上绕线并不困难，但刮去线端的漆皮时容易损伤导线。采用热融法可以去除线端的漆皮：将线端浸入小锡炉，漆皮就融化在熔融的锡液中，同时线端被镀上锡。燃烧法也是去除线端漆皮的简便方法之一：将线端放在酒精灯上燃烧，使漆皮碳化，然后迅速浸入乙醇中，取出后用棉布即可擦净线端的漆皮。

4. 扁平电缆

在数字电路特别是计算机类产品中，数据总线、地址总线和控制总线等连接导线往往是成组出现的，其工作电平、导线走向都大体一致。这种情况下，使用扁平电缆很方便。这种安装排线与安装插头、插座的尺寸、导线的数目相对应，并且不用焊接就能实现可靠的连接，不容易产生导线错位的情况。

目前使用较多的排线,单根导线内是 $\phi 0.1\text{mm} \times 7$ 的线芯,外皮为聚氯乙烯。导线根数为 8、12、16、20、24、28、32、37、40 线等规格。选购带状电缆时,一定要注意它的外形尺寸,如图 1-2 所示。

### 5. 电源软导线

从电源插座到机器之间的电源线是露在外面的,用户经常需要插、拔、移动,所以电源线不同于其他导线,在选用时不仅要符合安全标准,还要考虑到在恶劣条件下能够正常使用。



图 1-2 带状电缆的外形

① 选择电源线的载流量,要比机壳内导线的安全系数大。因为即使是正常的温升也会使用户产生不安全感。

② 在寒冷的环境中,塑料导线会发硬。要考虑气候的变化,应该能经受弯曲和移动。

③ 要有足够的机械强度,电源线经常被提拉并可能被重物挤压或缠绕。所以,导线的保护层必须能够承受这些外力作用。

RVB、RVS、YHR 几种软导线都适合用做电源线,其中又以有橡胶护套的 YHR 型为最好。



图 1-3 同轴电缆

### 6. 同轴电缆

同轴电缆内外由相互绝缘的同轴心导体构成的电缆:内导体为铜线,外导体为铜管或金属丝网。电磁场封闭在内外导体之间,故辐射损耗小,受外界干扰影响小。常用于传送多路电话和电视信号,如图 1-3 所示。

### 7. 高压电缆

高压电缆一般采用绝缘耐压性能好的聚乙烯或阻燃性聚乙烯作为绝缘层,而且耐压越高,绝缘层就越厚。表 1-12 是绝缘层厚度与耐压的关系,可在选用高压电缆时参考。

表 1-12 耐压与绝缘层厚度的关系

耐压 (DC) (kV)	6	10	20	30	40
绝缘层厚度 (mm)	0.7	1.2	1.7	2.1	2.5

### 8. 双绞线

在计算机网络通信中,由于频率较高,信号电平较弱,通常采用双绞线,双绞线抗电磁干扰性强。双绞线分成六类,即一类线、二类线、三类线、四类线、五类线和六类线,其中三类线以下的线已不再使用,六类线多用来提供 1 000Mb/s 服务。五类线分五类线和超五类线,超五类线目前应用最多,共 4 对绞线用来提供 10~100M 服务,分屏蔽和非屏蔽两种。如果是室外使用,屏蔽线要好些。一般的超五类线里都有四对绞在一起的细线,并用不同的颜色标明。

双绞线一般用于星型网络的布线,每条双绞线通过两端安装的 RJ-45 连接器(俗称水晶头)将各种网络设备连接起来。双绞线标准接法(EIA/TIA 568B 标准和 EIA/TIA 568A 标准)的目的是保证线缆接头布局的对称性,这样就可以使接头内线缆之间的干扰相互抵消。双绞线具体接法如下:

- (1) T568A 线序 绿白 绿 橙白 蓝 蓝白 橙 棕白 棕。
- (2) T568B 线序 橙白 橙 绿白 蓝 蓝白 绿 棕白 棕。
- (3) 直通线 两头都按 T568B 线序标准连接。

#### 1.2.3.5 绝缘材料

绝缘材料又称电介质,它在直流电压的作用下,只允许极微小的电流通过。绝缘材料的电阻

率（电阻系数）一般都大于  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ，在电子工业中的应用相当普遍。这类材料品种很多，要根据不同要求及使用条件合理选用。

### 1. 绝缘材料的主要性能及选择

（1）抗电强度 抗电强度又称耐压强度，即每毫米厚度的材料所能承受的电压，它与材料的种类及厚度有关。

（2）机械强度 一般是指抗张强度，即每平方厘米所能承受的拉力。不同用途的绝缘材料对机械强度的要求不同，例如，绝缘套管要求柔软，结构绝缘板则要求有一定的硬度并且容易加工。

（3）耐热等级 它是指绝缘材料允许的最高工作温度，它完全取决于材料的成分。按照一般标准，耐热等级可分为七级，参见表 1-13。在一定耐热级别的电子设备中，应该选用同等耐热等级的绝缘材料。必须指出，耐热等级高的材料，价格也高，但其机械强度不一定高。所以，在不要求耐高温处要尽量选用同级别的材料。

表 1-13 绝缘材料的耐热等级

级别代号	最高温度（℃）	主要绝缘材料
Y	90	未浸渍的棉纱、丝、纸等制品
A	105	上述材料经浸渍
E	120	有机薄膜、有机瓷漆
B	130	用树脂黏合或浸渍的云母、玻璃纤维、石棉
F	155	用相应树脂黏合或浸渍的无机材料
H	180	耐热有机硅、树脂、漆或其他浸渍的无机物
C	>200	硅塑料、聚氟乙烯、聚酰亚胺及与玻璃、云母、陶瓷等材料的组合

### 2. 常用绝缘材料

#### （1）薄型绝缘材料

薄型绝缘材料主要应用于包扎、衬垫、护套等。

① 绝缘纸。常用的有电容器纸、青壳纸、铜板纸等，具有较高的抗电强度，但抗张强度和耐热性都不高。主要用于要求不高的低压线圈绝缘。

② 绝缘布。常用的有黄蜡布、黄蜡绸、玻璃漆布等。它们具有布的柔软性和抗拉强度，适用于包扎、变压器绝缘等。这种材料也可制成各种套管，用做导线护套。

③ 有机薄膜。常用的有聚酯、聚酰亚胺、聚氯乙烯、聚四氟乙烯薄膜。厚度范围是 0.04~0.1mm。其中，以聚酯薄膜使用最为普遍，在大部分情况下可以取代绝缘纸、绝缘布并提高耐压、耐热性能。性能最好的聚四氟乙烯薄膜，耐热可达到 C 级，但价格高。

④ 粘带。上述有机薄膜涂上胶粘剂就成为各种绝缘粘带，俗称塑料胶带，取代传统的“黑胶布”，大大提高了耐热、耐压等级。

⑤ 塑料套管。除绝缘布套管外，大量用在电子装配中的是塑料套管，即用聚氯乙烯为主料制成各种规格、各种颜色的套管。由于耐热性差（工作温度为 -60~70℃），不宜用在受热部位。还有一种热缩性塑料套管，经常用做电线端头的护套。

电子设备中的整机在装焊时必须考虑其导线接线关系去向的标识问题。因为在一束线扎中，同样颜色的导线在一把线束中是很常见的事，为考虑设备的使用性、维修性，在焊接导线时就应将其标识套管套在焊接端子上（标识套管的大小要根据焊接端子的大小来选取），以便送检和日后的使用维修。

一般来讲，对于直径 2~5mm 的白色 PVC 套管，现在都是靠设备打标记，常用的设备有热



打印机和手提式打印机。标记笔常用于机箱中硬电缆的配装和较粗的电缆标记。

### (2) 绝缘漆

使用最多的是浸渍电器线圈和表面覆盖。常用的绝缘漆有油性浸渍漆(1012)、醇酸浸渍漆(1030)、环氧浸渍漆(1033)、环氧无溶剂浸渍漆(515-1/2)、有机硅漆(1053)、覆盖漆、醇酸磁漆、有机硅磁漆等。其中,有机硅漆能耐受较高的温度(H级),无溶剂漆使用较为方便。

### (3) 热塑性绝缘材料

热塑性绝缘材料有硬聚乙烯板、软管及有机玻璃板、棒。可以进行热塑加工,但耐热性差。一般只用于不受热、不受力的绝缘部位。例如做护套、护罩、仪器盖板等。透明的有机玻璃适用于加工仪器面罩、铭牌等绝缘零件。

### (4) 热固性层压材料

常用的层压板材(板厚为0.5~50mm)有酚醛层压纸板(3020~3023)、酚醛层压布板(3025、3027等)、酚醛层压玻璃布板(3230~3232)、有机硅环氧层压玻璃布板(3250)、环氧酚醛层压玻璃布板(3240)等。上述各类材料都有相应的管材和棒材,棒材的直径从6mm到数百毫米,管材的壁厚是1~9mm。它们的共同特点是具有良好的电气性能和机械性能,耐潮、耐热、耐油。

### (5) 云母制品

云母是具有良好的耐热、传热、绝缘性能的脆性材料。将云母用黏合剂黏附在不同的材料上,就构成性能不同的复合材料。常用的有云母带(沥青绸云母带、环氧玻璃粉云母带、有机硅云母等),主要用做耐高压的绝缘衬垫。

### (6) 橡胶制品

橡胶在较大的温度范围内具有优良的弹性、电绝缘性、耐热、耐寒和耐腐蚀性,是传统的绝缘材料,用途非常广泛。近年来电子工业所用的天然橡胶已被合成橡胶取代。

## 1.2.4 电子设备制造工艺基础

### 1.2.4.1 制造工艺的概念和种类

工艺是企业生产的中心环节,是组织生产和指导生产的一种手段。在产品的设计研制阶段,它的内容是确定产品的制造方案,并完善生产前的技术准备工作。在产品的制造阶段,它的内容是组织和指导符合设计要求的加工生产,直到包装出厂为止。因此,工艺就像一条纽带把企业各部门、各个生产环节联系起来,成为一个完整的制造体系。

常见电子设备制造工艺的种类如下:

#### (1) 机械加工工艺

机械加工工艺包括车、钳、刨、铣、镗、磨、插齿、铸造、锻打、冲、挤压、拉伸等。其主要功能是改变材料的几何形状。

#### (2) 表面加工工艺

表面加工工艺包括压印、压花、抛光、印刷、油漆、电镀、氧化、铭牌制作等工艺。其主要功能是提高表面装饰性、使产品具有富丽堂皇之感,同时也起到防腐蚀的作用。

压印、压花工艺在钣金件上应用很多,包括标签粘贴位置指示、产品编码、生产日期、版本、厂家代号,甚至图案等,都可以利用这两种工艺进行加工。

压印是使材料厚度发生变化,将挤压的材料充塞在有起伏的模腔内,使零件上形成起伏花纹或字样。一般情况下是在封闭模中进行,以免金属被挤到模子型腔外面;对于比较大的零件或形

状特殊成型后进行切边的零件，可在敞开模中进行。为使零件得到良好的表面质量，成型前应将毛坯进行退火、酸洗、喷沙等处理。

压花工艺与压印类似，只是变形的深度较小，所需的压力也较小。压花在带有与凸模配合的相应凹槽的凹模上进行，其凹模的宽度要比凸模上的大一些，深度要比凸模上的浅。

### （3）连接工艺

连接工艺包括烧焊、电焊、点焊、氮弧焊、保护焊、锡焊、铆装、螺装、胶合等工艺。主要功能是将两个或两个以上的零件连接起来。

### （4）化学工艺

化学工艺包括电镀、浸渍、灌注、油漆、胶木化、防氧化工艺等。其主要功能是防腐蚀。

### （5）塑料工艺

塑料工艺主要分为压塑、注塑及吹塑。

### （6）总装工艺

总装工艺包括总装配和装联、调试、包装，以及总装前的准备加工工艺和胶合工艺。

### （7）其他工艺

其他工艺包括检验工艺、老化筛选工艺、热处理工艺、数控工艺、电火花工艺等。

## 1.2.4.2 制造工艺的作用和地位

工艺工作包括工艺管理、工艺技术、工艺设备、人的技能和工艺材料等要素。企业的整个活动是生产活动，而在生产活动中有 80%~90%是具有一定技能的人操作一定的工艺设备，按照特定的工艺规程和方法去制造产品，这些活动都是工艺要素的有机结合。因此，企业的活动有 80%~90%是属于工艺活动。对于复杂产品，从原材料进厂到产品出厂，往往要经过数以千百道工序的生产过程，工艺工作就成为企业进行计划管理、技术准备、生产调度、原材料供应、劳动调配乃至经济核算的技术依据；又是加工操作、安全生产、计量检验的技术指导。因此，工艺工作是解决企业的产品怎样制造，采用什么方法、采用什么生产资料去制造的综合性活动。所以工艺工作水平的高低，直接决定在一定设计条件下，能制造什么水平的产品。这说明工艺就是生产力的基本要素。因此，发展社会生产力就必须加强工艺工作。工艺工作在促进社会生产力发展方面起着重要作用。

科学技术必须经过一个物化过程才能转化为生产力，这种转化正是通过工艺技术、工艺设备、工人的操作技能以及包括工艺管理在内的工艺工作来实现的。科学技术的发展，使工艺设备更加先进、精密、高效，自动化程度愈来愈高。因此，科学技术物化为工艺设备之后对生产力发展就会产生巨大的威力。

工艺技术是新产品开发、老产品更新换代的重要技术保证。新产品开发和老产品更新换代，不仅是外形尺寸的变化，而且是内在质量的提高，产品性能、结构设计都有新的突破。因此，对设计、材料、工艺和加工方法都有新的要求。先进、合理的工艺技术是产品发展的前提和条件，对产品的开发和创新起着重要作用。先进的设计，可以促进工艺技术的开发，而先进工艺技术的开发，又可为设计水平的提高创造条件。

以工艺进步为基本内容的技术进步是生产发展的主要动力，劳动生产率的提高，60%~80%是依靠采用先进的工艺技术和管理技术而实现的。当今的世界已进入知识经济时代，大到一个国家，小到一个公司，经济、市场的竞争往往表现为关键工艺技术的竞争。从法律的角度，通过专利的手段对关键技术的知识产权进行保护；在企业内部，通过严格的文件管理、资料授权管理把

企业的关键工艺技术掌握在一部分人手里，行业之间、企业之间实行技术保密和技术封锁，是非常普遍的现象。“工艺就是专利，专利就是资本”。因此，获取、收集电子设备制造工艺的关键技术是非常困难的。

### 1.2.4.3 制造工艺的特点和现状

#### 1. 制造工艺的特点

随着信息时代的到来，人们认识到，没有先进的电子设备制造工艺就不能制造出高水平、高性能的电子设备。作为与生产实际密切相关的技术学科，电子设备制造工艺学有着自己明显的特点，归纳起来主要有以下几点。

##### (1) 涉及众多科学技术领域

电子设备制造工艺学与众多的科学技术领域相关联，与其他学科的知识相互交叉、相辅相成，成为技术密集的关键学科，所以，对电子工程技术人员的知识面、实践能力的要求比较高，即他应该是通常所说的复合型人才。

20 世纪 90 年代以来，以计算机、通信和消费类电子设备为代表的信息技术产业迅猛发展，无论是为社会进步所发挥的巨大技术作用，还是创造的产值、利润，以及所提供的劳动力就业机会，都使它成为国民经济的支柱性产业，引发了我国产品结构、产业结构和经济结构的巨大变化。并且，随着全球经济一体化的进程，被称为 OEM (Original Equipment Manufacture, 原始设备制造，俗称“贴牌生产”) 的生产方式已经成为电子设备加工的重要模式之一。按照传统的领域划分，IT 产品技术可以分属于不同的专业，如计算机、通信、无线电技术、机械制造技术、自动控制、家用电器、自动化仪表、电子测量技术等，但从市场经济要求新技术商品化和产品化的角度看，上述不同专业的设计成果都必须历经生产过程才能转化为经济效益和社会效益，而新的元器件、新的材料、新的制造设备、新的生产手段、新的产品质量理念和新的生产管理模式的发展，要求制造技术和生产过程本身具有特别的性质：一方面，它不仅隶属于某一个技术专业，上述所有专业其最终产品的生产方式都大同小异，可以算是各专业的“通用技术”；另一方面，它所涉及的知识内容极多，足以构成一个独立的专业领域，因而成为社会需求量很大的“专业技术”。

##### (2) 随电子技术的发展而发展

电子设备的工艺形式随着电子技术的发展而发展。我们以其中的结构工艺为例来说明这个问题。大家知道，电子技术始于通信技术，即电报和电话的发明和使用，后来由于电磁波理论的提出与实用，出现了无线电通信，从此，借助电磁信号来传输信息的方法便得到了应用，并且应用范围不断扩大，设备的结构形式也日益变化。

早期的电子设备结构与有线通信设备相似，采用木箱结构，电气元件固定在一块绝缘板上，并水平地放在一个木箱上，主要电气元件都凸出在绝缘板的外边，箱内主要用于导线连接，安装方式为螺钉连接。

20 世纪 20 年代，真空二极管、三极管出现，以电子管为中心的电子技术得到广泛应用，无线电收音机成为商品，通信设备的应用日益扩大（如安装于汽车和舰船上），设备的强度和电磁屏蔽的问题变得十分突出，而不得不在结构设计中加以考虑。这时的电子设备为一块水平底板放在箱中，箱前安装一块装有调节旋钮的胶木板。

20 世纪 30 年代，电子设备的外壳采用了金属材料，设备结构的基本布局是由一个水平放置的金属底板及一个垂直放置的面板构成机芯，各种元器件布置在金属底板的上面，而把阻容元件及其连线布置在底板的下面，在面板上放置控制器、显示器及输入、输出的接线端子，外面配上

机箱。当时大型设备的结构形式是把底板和面板组成的机芯一层层地装入机架内形成一个整体。由于当时所用的电子元器件是电子管、大型电阻、电容，加之调谐机构是手动的，因此体积和重量都很大。

20 世纪 40 年代，较为复杂的电子设备，如电视机、雷达问世。为了防护坦克和飞机上的电子设备，使之不受气候的影响，研制出密封外壳；为了防止机械过载，研制出减振器，使设备的结构功能进一步得到完善。

晶体管的出现及应用，使电子技术发生了一场革命。电子设备进一步复杂化，对结构提出了新的要求，即要有最小的体积和重量。因此采用提高集成度的新方法，这就导致了单、双层印制电路板的大量使用，以及同轴电缆和微带传输线的应用。集成电路、微型组件的产生又进一步提高了组装密度，因而设备中小规模和中规模单元块结构出现了。

20 世纪 80 年代，大规模集成电路及超大规模集成电路已经出现，电子设备中为提高可靠性、降低能耗和成本，大量采用集成电路及高密度印制电路板（多层印制板），现在称为微电子设备。电子设备进一步向固体化、小型化、高可靠性和多功能等方向发展。

### （3）更新快

随着电子科学技术的飞速发展，对电子设备制造工艺学也提出了越来越高的要求。人们在实践中不断探索新的工艺方法，寻找新的工艺材料，使电子设备制造工艺学的内涵及外延迅速扩展。与其他行业相比，电子设备制造工艺技术的更新要快得多。经常有这样的情况发生：某项新的工艺方法还未能全面推广普及，就已经被更先进的技术所取代。

## 2. 我国制造工艺的现状

近年来，世界各工业发达国家和港台地区的电子厂商纷纷把工厂迁往长江三角洲，这里制造的电子设备行销全世界，中国成为世界电子工业的加工厂已经初见端倪；但在某些原来电子工业基础较好的城市和地区，电子设备制造企业的发展和生存却举步维艰，设备陈旧，技术进步缓慢，缺乏能够大批量生产的产品和稳定的技术队伍。所以，就我国电子设备制造业的整体来说，虽然不断从发达国家引进最先进的技术和设备，却还未能形成系统的、现代化的电子设备制造工艺体系。我国电子行业的工艺现状是“两个并存”相当突出：有些企业已经具备了世界上最好的生产条件、购买了最先进的设备，也有些企业还在简陋条件下使用陈旧的设备维持生产；先进的工艺与陈旧的工艺并存，引进的技术与落后的管理并存。在当代的电子设备制造技术领域，我国在整体上还处在比较落后的水平，缺少稳定的、一大批高素质的工艺技术队伍。

纵览国内外各厂家生产的同类电子设备，它们的电路原理并没有太大的差异，造成质量水平不同的主要原因存在于生产过程及手段之中，即体现在电子设备制造工艺技术和工艺管理水平的差别上。在我国经济比较发达的沿海城市，或者工艺技术力量较强、实行了现代化工艺管理的企业中，电子设备的质量就比较稳定，市场竞争力就比较强。同样，对于有经验的电子工程技术人员来说，他们的水平主要反映在设计方案时充分考虑了加工的可能性和工艺的合理性上。

### 1.2.4.4 制造工艺的研究对象

#### 1. 材料

电子设备制造所用到的材料，包括电子元器件、导线类、金属或非金属材料以及用它们制作的零部件和结构件。我国电子工业与世界发达国家相比，在电子设备材料、特别是电子元器件的研制和开发领域，差距巨大。据统计，当今世界集成电路芯片制造业有 40% 在美国、25% 在日本、12% 在韩国，中国只占 1.2%。这种局面，与中国的国际地位极不相称。

整机电子产品及其技术水平，主要取决于元器件制造工业和材料科学的发展水平；能否尽快熟悉、掌握、使用世界上最新出现的电子元器件和材料，能否在更大范围内选择性能价格比最佳的电子元器件和材料，把它们用于新产品的开发与制造，往往是评价、衡量一个电子工程技术人员业务水平的主要标准。

## 2. 设备

电子设备制造过程中必然要使用各种工具、工装、仪器、仪表、机器和设备，熟练掌握并正确使用它们，是对电子设备制造过程中每一个岗位操作者的基本要求；十几年以来，表面安装技术（SMT, Surface Mounting Technology）的发展带动了生产设备行业的进步。最新的科学技术手段，如激光技术、计算机控制技术、精密机械制造技术、机电一体化技术等，使生产设备更加智能化、人性化、高速度和高精度，电子产品生产设备制造成为效益最好的行业。到目前为止，我国电子设备制造企业中能够看到的生产工具和生产设备，除了部分手动工具、半自动设备是国内制造的以外，高档生产设备几乎全部是国外进口的，这些进口设备价格极其昂贵，动辄需要花费几十万人民币，甚至数百万美元。生产设备的购置、运行、管理、维护以及折旧费用，已经在产品的生产成本中占据很大的密度。

电子设备工艺技术的提高，产品质量和生产效率的提高，主要依赖于生产设备技术水平和生产手段的提高。

## 3. 方法

对电子材料的利用、对工具设备的操作、对制造过程的安排、对生产现场的管理——在所有这些与生产制造有关的活动中，“方法”都是至关重要的。在这些过程中，无论是硬件的制造还是软件的设计，都需要培训练习、分析思考、总结经验，不断推出好的、更好的方法，不断用新的方法代替旧的方法。有时候，方法只是操作者个人经验性的体会和手法，但假如行之有效，经过科学的研究和总结，这方法就会变成现代科学技术的一个组成部分，成为生产工艺技术的一种标准方法被普遍推广。

## 4. 人力

电子工业是劳动密集型产业，它所吸纳的劳动力人数，在全世界的工业劳动力中占有很大的密度。我国成为世界电子设备制造业的加工厂，劳动力价格低廉是重要的原因。我国的电子设备制造业要从“来料加工型”全面转变为“设计制造型”，劳动力相对低下的平均素质就成为发展的瓶颈。近年来，“人力资源”竞争已经成为行业之间、企业之间最重要的竞争领域。一般地，企业工艺人员与设计人员的比例对整机来说，应当取 2:1，而元件厂应当取 3:1。

## 5. 管理

工艺管理水平是工业技术进步的重要标志之一。合理的、先进的工艺管理是企业产品质量的保证，并将在保证产品质量的前提下促进劳动生产率的大大提高，降低消耗，减少产品的设计、生产工艺准备、制造、技术服务和修理时间。

工艺管理定义为“科学地计划、组织和控制各项工艺工作的全过程”。根据这个定义，工艺管理，一方面它存在于将原材料、半成品转变为成品的全过程中，即对制造技术工作所实施的科学的系统管理中；另一方面，它又有解决、处理生产过程中人与人之间的生产关系的社会科学的性质和功能。

近年来，建立在信息技术基础上、以提高企业资源效能为系统思想、为企业提供业务集成运行中的资源管理方案 ERP（Enterprise Resources Program，企业资源规划），已经开始在国内的电子设备制造企业中推广，这是由美国著名的计算机技术咨询和评估集团 Garter Group 公司提出的

一整套企业管理系统体系标准。ERP 系统集成信息技术与先进的管理思想于一身，成为现代企业的运行模式，反映时代对企业合理调配资源、最大化地创造社会财富的要求，其先进性、科学性已为很多发达国家的企业成功应用所证实。显然，ERP 的推广使用必将使我国电子设备制造企业的科学管理迈上更高的台阶。

#### 1.2.4.5 制造工艺的管理系统

在现代工业企业中，工艺管理系统作为一种信息流，它的功能是对工艺过程进行技术管理和控制，以保证工艺活动按照事先设计的路线、流程、规程等技术要求进行，达到优质高产。工艺系统必须在工艺管理系统控制之下，才能有效地工作。工艺管理系统又是企业生产系统中最基本、最重要、涉及面最广的子系统，也是企业技术开发子系统与生产系统结合的桥梁，是技术信息指导生产、控制质量的具体体现。因此，它又是生产系统中实施行政和技术管理的主要信息流。工艺管理是保证工艺方法和工艺技术在生产过程中得以正确贯彻并使工艺技术和方法在生产实践中不断提高和发展，以适应生产发展的一门管理科学。建立一个有效的统一的工艺管理系统是企业优质、高效地实现经济生产目标的基本保证。

工业企业工艺管理体系主要涉及下列部门：设计、设备、工具、物资供应、生产计划、检验计量、质量管理及劳动、教育部门。在机电工业企业中一般由设计、动力（设备、工具）、物资供应、检验、计量、劳动人事及教育等部门组成。

工业企业的工艺管理机构是具体管理企业工艺技术的部门。它根据企业大小、生产的产品规模不同而异。一般二级机构居多，大型企业多为三级。二级工艺管理机构如图 1-4 所示。厂设工艺科，车间设工艺组（或技术组）。工艺科在技术副厂长或总工程师领导下，负责全厂的工艺管理工作；车间负责现场工艺管理和工艺贯彻工作。

小型企业多为一级管理，其管理机构如图 1-5 所示。厂内设技术科（或工艺科），科内设工艺组，负责全厂的工艺管理。各生产车间必须按产品图样、工艺规程和有关标准进行生产，严格执行现场工艺纪律。

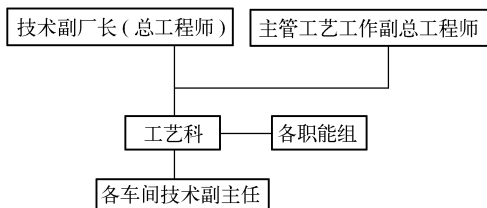


图 1-4 二级工艺管理机构

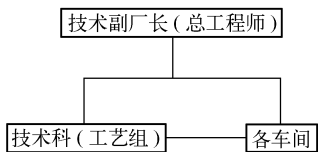


图 1-5 一级工艺管理机构

#### 1.2.4.6 制造工艺的管理内容

无论企业生产的产品类型、生产规模等有多少不同，但工艺管理一般均应包括下列各项具体内容。

(1) 编制工艺发展规划 为了提高企业的工艺水平，适应产品发展需要，各企业都要结合本企业的实际情况编制企业技术措施规划，如新工艺、新设备研究开发规划、技术攻关规划和工艺组织措施规划、工艺路线调整规划、工艺技术改造规划等，这些规划应纳入企业总体规划。

(2) 工艺试验研究与开发 这项工作是提高企业工艺水平的主要途径，是加速新产品开发、

稳定提高产品质量、降低消耗和提高效益的基础,各企业都应创造条件积极开展这项工作。工艺试验研究主要内容包括:发展规划中的研究开发项目,生产工艺准备中的新技术、新工艺、新材料、新设备的试验研究及现场中存在的重大产品质量问题。

(3) 产品生产工艺准备 产品生产工艺准备包括新产品开发和老产品改进过程的工艺性调查与研究,分析和审查产品结构的工艺性,设计与评价工艺方案,设计与优选工艺路线,设计工艺规程及其他有关工艺文件,制订工艺定额,设计与评价专用工艺设备和工艺设备,进行工艺验证、工艺总结和工艺整顿。

(4) 生产现场的工艺管理 它是保证产品质量稳定的最重要一环。它能最大限度地提高劳动生产率和减少物耗,实施文明生产和改善劳动条件。生产现场工艺管理主要包括:科学地分析产品零件部件的工艺流程,合理地规定投产批次,做好原材料、辅助材料的供应,指导、监督工艺规程的正确实施并进行工序的质量控制。

(5) 工艺纪律管理 它是加强工艺管理的重要内容,是建立企业正常生产秩序、确保产品质量的有效措施。主要内容有:制定各种工艺管理制度;工艺文件正确、完整、统一、清晰;安排生产必须以工艺文件为主;凡投入的原材料、零件、外协件必须符合设计工艺要求;设备必须保证正常运转、安全可靠;操作人员必须持证上岗;并做到定人、定机、定工种。

(6) 工艺情报管理 包括收集国内外新技术、新工艺、新材料、新设备的研究与使用情况,收集有关新的工艺标准、手册、图册、先进的工艺规程或规范以及有关的工艺研究报告、论文和革新成果等工作。

(7) 工艺标准化 包括工艺术语、符号、代号、工艺文件格式、工艺要素与参数、操作方法、工艺设备等标准化和典型化。

#### 1.2.4.7 产品结构工艺性审查

产品结构工艺性是指所设计的产品在满足使用要求的前提下,制造、维修的可行性和经济性。产品设计师既要掌握产品设计方面的专业技术,又要懂得名目繁多的工艺技术,保证所设计的零件有良好的工艺性,这是十分困难的。为了弥补产品设计人员对产品结构工艺方面的知识不足,企业在新产品开发和改进设计的工作程序中,为了保证所设计的产品图纸有良好的“结构工艺性”,即使新设计的产品在满足使用功能的前提下应符合一定的工艺指标要求,且能以最经济、最合理的方法生产出来并要便于使用与维修,规定了工艺部门必须在产品技术设计阶段进行“工艺分析”,在产品工作图设计阶段进行“工艺性审查”,这两个环节的全过程称为“产品结构工艺性分析和审查”,习惯上简称为“工艺性审查”。工艺部门对产品图纸逐张进行“工艺性审查”后,认为该图纸已经符合“工艺性”要求后,才能在每张图纸的“工艺会签”栏上签名。只有经过工艺部门签署后的图纸才能进行产品设计定型鉴定并投入批试生产。

故此,结构工艺性问题是企业的设计师和工艺师合作的最重要内容,否则产品就难以达到预期的技术经济效益。

##### 1. 产品结构工艺性审查对象

凡符合下列情况的产品,都应进行产品结构工艺性审查。

- ① 自行设计的新产品。
- ② 老产品改型设计。
- ③ 对外来产品图样(移植产品)首次生产的产品。
- ④ 引进样机测绘仿制的产品。

- ⑤ 系列产品增加或补充型号的产品。
- ⑥ 老产品批量增大而改变了生产类型（如原来单件小批生产变为大批量生产）。
- ⑦ 对老产品的技术经济指标需要有重大提高（如降低能耗、提高材料利用率等）。

## 2. 产品结构工艺性审查的任务

产品结构工艺性审查是使新设计的产品在满足使用功能的前提下，符合一定的工艺性要求，以便在现有生产条件下能用比较经济、合理的方法将其制造出来；并要便于使用和维修。通过工艺性审查应达到以下几点：

① 可以早期发现产品设计中不必要的过高技术要求和切合本企业实际情况的工艺性问题，予以纠正或协调解决。

② 对产品设计上技术要求很高，而且是合理的和必需的，但本企业生产技术状况一时难以解决的，则工艺部门可以提前进行工艺实验或组织力量攻关，以减少和避免在生产过程中发生重大工艺技术问题。

③ 能提前发现新产品中的主要零部件所需要的关键设备、特殊工艺设备和测试仪器、关键工种以及关键原料、元器件和外协件等问题，以便提前安排、设计和订货。

④ 可为编制工艺方案做好准备，缩短工艺准备周期。

## 3. 产品结构工艺性审查的主要内容

为了保证所设计的产品具有良好的工艺性，在产品设计的三个阶段内均应进行工艺审查。审查内容分别如下：

① 方案设计阶段的审查内容。从制造观点分析产品结构方案的合理性；分析产品结构的继承性、标准化与系列化程度；分析产品主要组成部分是否便于装配、调整和维修；分析主要材料选用是否合理，分析主要零部件加工的可行性。

② 技术设计阶段的审查内容。分析产品各组成部件进行平行装配和检查的可行性；分析总装配的可行性；分析装配时避免或减少加工的可能性；分析工艺关键件在本厂制造的可行性；分析产品主要参数的可检查性和主要配合精度的合理性；特殊零件外协加工的可行性。

③ 工作图设计阶段的审查内容。各部件是否具有装配基面和正确的位置、尺寸联系（可利用尺寸链原理进行验算），是否便于调整和装卸；各大装配单元分解成平行装配的小装配单元的可行性；审查零件的铸造、锻造、冲压、焊接、热处理、电镀、切削加工、装配和维修的工艺性；零件的几何形状、精度和粗糙度是否合适；尺寸的标志是否合理、齐全；零件的加工、装配和检验的基面是否经济合理。

## 4. 产品结构工艺性评价的指标项目

对产品结构工艺可以进行定性评价，也可以进行定量评价。

（1）定性评价 在设计的各个阶段上由设计师、工艺师和经济师共同根据经验和评价原则，概略地对产品结构工艺性给予评价，用于产品最佳方案的预选。这种方法不太准确，但比较简便易行，是目前最常用的方式。

（2）定量评价 定性评价后，如果认为有进一步深入评价的必要，则可在定性评价基础上，计算产品结构工艺性各项评价指标，并与有关标准进行对比分析，若有不足采取相应的改进、提高措施。这是比较先进的评价方式。

产品结构工艺性评价主要指标项目包括：产品制造劳动量、单位产品材料用量、材料利用系数、产品结构装配性系数、产品的工艺成本、产品的维修劳动量、加工精度系数、表面粗糙度数、结构继承性系数、结构标准化系数、结构要素统一化系数。



### 5. 产品结构工艺性审查的分工和程序

(1) 产品结构工艺性审查的任务 该任务主要由工艺部门的产品主管工艺师负责,各有关部门配合。具体分工和工作程序如下:

- ① 根据企业新产品试制大纲由计划部门下达产品工艺性审查计划,并进行检查考核。
- ② 设计部门根据计划进度要求提供全套产品工作图样给工艺部门,并与工艺部门密切合作完成审查任务。
- ③ 工艺部门则由产品主管工艺师为主组织各专业工艺师分头进行审查。
- ④ 各专业工艺师(员)在审查时发现工艺性问题应填写“产品结构工艺性审查记录单”,并统计被审查图样张数和需要更改张数。
- ⑤ 产品主管工艺师汇总“产品结构工艺性审查记录单”和需要修改设计的图样一并交设计部门。
- ⑥ 设计者根据工艺性审查记录单上意见和建议进行修改设计,并把图样再返回工艺部门复查。
- ⑦ 当设计人员和工艺人员意见不一致时,应协商解决,经协商意见仍然有分歧时则由总工程师办公室(技术办公室)协调;对重大的关键性的有争议的工艺性问题,则由总工程师召集设计、工艺、车间等有关部门参加,在充分发扬技术民主、尊重科学的基础上协商解决;必要时应进行技术经济分析和工艺试验并由厂部裁决。
- ⑧ 产品图样全部审查结束后由该图样审查者在“工艺”栏内签名,由产品主管工艺师汇总并进行统计分类写出工艺性审查报告,作为产品设计定型鉴定文件。

(2) 根据企业不同情况还必须注意的问题

- ① 为保证工艺性审查质量,在计划安排上保证工艺部门有充足的时间进行工艺性审查。
- ② 设计部门送交工艺部门的设计图样应是完整成套的,也可经协商分批递交,但应是一个或几个完整的整件。
- ③ 若首次递交工艺部门的设计图样为原图,并有设计、审核人员签字,经工艺人员审查会签后原图全部返回设计部门。
- ④ 若递交工艺部门的设计图样是底图,则经工艺人员审查会签后不应再返回设计部门,一般应转交标准化室或资料室。
- ⑤ 为了使工艺师和设计师能密切合作,主管工艺师在新产品设计一开始就应参与调研、编制任务书和确定设计方案等工作。

#### 1.2.4.8 制造工艺方案的设计

工艺方案是指导产品工艺准备工作的依据,除单件小批生产的简单产品外,都应具备工艺方案。工艺方案的设计,应该在保证产品质量的同时,充分考虑生产周期、产品成本 and 环境保护,并根据企业的能力,积极采用国内外先进工艺技术和设备,不断提高企业工艺水平。

设计工艺方案的依据是产品图样及有关技术文件,产品生产大纲,生产性质和生产类型,企业现有条件,以及国内外同类产品的工艺经验。

工艺方案一般分三类。

##### (1) 样机试制工艺方案

样机试制工艺该方案应在评价产品结构工艺性基础上,提出样机试制所需的各项工艺技术准备。主要内容有:对产品结构工艺性的评价和对工艺工作量的大体估计;提出自制件和外协件的初步划分意见;提出必需的特殊设备购置或设计、改装意见;必备的专用工艺准备设计、制造意见;关键零(部)件的工艺规程设计意见;有关新材料、新工艺的试验意见;主要材料

和工时的估计。

### (2) 小批量试制工艺方案

小批量试制工艺该方案应在样机试制工作的基础上,提出批试前所需的各项工艺技术准备工作,主要内容有:样机试制阶段工艺工作小结;自制零件和外协件的调整意见;提出应设计的全部工艺文件及要求;自制件工艺路线的调整意见;提出主要铸、锻件毛坯的工艺方法;对专用工艺设备和工艺设备的设计或购置意见;对特殊零件或原材料的要求;对工艺、工装的验证要求;对有关关键件的制造周期或生产节拍的安排意见;根据产品复杂程度的技术要求所需的其它内容。

### (3) 批量生产工艺方案

批量生产工艺该方案是在总结小批试制情况的基础上,提出批量投产前需进一步改进、完善工艺、工装和生产组织措施的意见和建议,主要内容有:对小批试制阶段工艺、工装验证情况小结;关键件质量攻关措施意见的关键工序质量控制点设置意见;工艺文件和工艺设备的进一步修改、完善意见;专用设备或生产自动线的设计制造意见;有关新材料、新工艺的采用意见;对生产节拍的安排和投产方式的建议;装配方案和车间平面布置的调整意见。

工艺方案设计由主管工艺师按照上述原则提出实施方案,交总工程师审查或召集有关科室参加会审,通过技术经济分析,确定最佳方案。

## 1.2.4.9 制造工艺规程的设计

工艺规程设计是工艺准备的基本工作。它是根据工艺方案中所确立的各项技术经济指标和工艺原则,结合生产条件,将制造产品或零件的工艺过程的操作方法通过文件或附图的形式明确具体地表示出来。工艺规程不仅是直接指导现场操作的重要技术文件,也是安排计划、生产调度、质量检验、劳动组织、材料供应、工具管理、经济核算的技术依据。

工艺规程是硬性规定,从事生产的每一个人都必须严格遵守,不得任意改变。即使在某一工艺规程试行中确需更改规程时,也要经过一定的审批手续,得到认可后才能审慎修正。随着科技进步、生产条件的改变或生产数量的变化,为了提高产品质量和生产效率、降低产品成本,工艺规程可由工艺设计部门重新制定。

### 1. 工艺规程的种类和内容

工艺规程的种类和内容应根据产品的生产性质、生产类型和产品的复杂程度不同有所区别。生产性质是指样机试制、小批量试制和正式批量生产。样机试制主要是验证产品设计结构,工艺文件不要求完整,各企业可根据具体情况而定;小批试制主要验证工艺,所以小批试制的工艺条件基本上应与正式批量生产的工艺文件相同,不同的是后者通过小批试制工程验证后的修改、补充,更加完善。生产类型是企业(车间、工段、班组)生产专业化程度的分类。产品的复杂程度,由产品结构、精度和结构工艺性而定,一般可分为简单产品和复杂产品。

#### (1) 工艺规程的类型

专用工艺规程是针对每一个产品零件所设计的工艺规程;通用工艺规程分典型工艺规程和成组工艺规程;标准工艺规程是已纳入标准的工艺规程。

#### (2) 工艺规程的主要内容

- ① 规定合理的工艺顺序,确定零件、部件、整机最经济的加工方法。
- ② 规定各专业工序的内容和规范,以及各工序的技术要求或工艺细则。
- ③ 规定或选择工序采用的工具、夹具、模具、设备和测试仪表。
- ④ 规定质量检验工序和质量检验方法,选择检验工具和量具。

⑤ 规定运输半成品及产品的合理方法,选择合适的容器和运输工具。

⑥ 规定安全技术规范。

## 2. 工艺规程的文件形式及其应用范围

工艺过程卡用于单件小批生产的产品;工艺卡片用于各种批量生产的产品;工序卡片用于大批量生产的产品和单件小批生产中的关键工序;操作指导卡片(作业指导书)用于建立工序质量控制点的工序;工艺守则则为共同遵守的通用操作规程;检验卡片用于关键工序检查;调整卡片用于自动与半自动机床加工;毛坯图用于铸、锻件等毛坯的制造;工艺附图根据需要与工艺或工艺卡片配合;装配系统图用于复杂产品的装配,与装配工艺过程卡片或装配工序配合。

## 3. 设计工艺规程的基本要求

工艺规程是直接指导现场生产操作的重要技术文件,应做到正确、完整、统一、清晰;在充分利用企业现有生产条件的基础上,尽可能采用国内外先进工艺技术和经验;在保证产品质量的前提下,尽量提高生产率和降低消耗;结构特征和工艺特征相近的零件应尽量设计典型工艺规程;设计工艺规程必须符合劳动法和环境保护法;各专业工艺规程应协调一致,不得相互矛盾;工艺规程的幅画、格式与填写方法要遵循 JB/Z187.3—88 的规定;工艺规程中所用的术语、符号、代号要符合相应标准的规定;工艺规程中的计量单位应全部使用法定计量单位;工艺规程的编号按 JB/Z254 的规定。

## 4. 设计工艺规程的主要依据

产品图样及技术条件;产品工艺方案、生产纲领、企业生产条件;产品零、部件工艺路线表或车间分工明细表;有关工艺标准、工艺设备和工艺准备资料;国内外同类产品的有关工艺资料。

## 5. 零件典型工艺设计程序

典型工艺是根据零件结构等工艺特征进行分类编组,对同组零件制定统一加工方法与流程。研究结构形式相同的一组零件或各种零件的同一工艺要素的制造工艺,找出工艺上的共性,根据产品的要求,结合企业的实际条件,采用比较先进合理的工艺方法,并用通用技术文件指导具体工艺文件的编制,这就是工艺典型化的主要任务。典型工艺的编制程序如下:

(1) 根据零件的结构形状、尺寸、加工质量及毛坯种类分为类或组(或型)

(2) 每组选择一个适当的代表零件

一般在一组内选一个零件或几个零件为代表件;也可根据组内各零件的工艺确定一个“假想零件”为代表。

(3) 针对代表零件编制典型工艺过程卡片和典型工序卡片 这种典型工艺过程卡片和典型工序卡片为同组零件所通用。目前应用最多的是典型工艺,典型工艺往往取决于产品及零、部件的标准化;反之,工艺规程典型化又可促进产品及其零、部件标准化。

### 1.2.4.10 制造工艺定额的编制

工艺定额包括材料消耗定额和劳动消耗工艺定额。

#### 1. 材料消耗定额

构成产品的主要材料 and 产品生产过程中所需辅助材料,均应编制消耗工艺定额。该定额应在保证产品质量及工艺要求的前提下,充分考虑经济合理地使用材料,最大限度地提高材料利用率,降低材料消耗。编制材料消耗定额的依据是产品零件明细表和产品图样、零件工艺规程、有关材料标准和手册的下料标准。

材料消耗定额编制方法有三种:技术计算法、实际测定法和经验统计分析法。这三种方法各

有优点，在实际工作中一般结合使用。通常，主要材料消耗工艺定额的制订以技术计算法为主，辅助材料定额可酌情采用经济统计法，也可分别按主要材料消耗定额比例或按单位产品用量确定。实际测定法一般用于工艺方法确定的大批量生产。

用技术计算法编制型材、管材和板材机械加工件和锻件材料消耗工艺定额的程序如下：

(1) 根据产品零件明细表或产品图样中的零件净重或工艺规程中的毛坯尺寸计算零件的毛坯重。

(2) 确定各类零件单件材料消耗工艺定额，制定定额时可采用四种方法：选料法，下料利用率法、下料残料率法和材料综合利用法。

① 选料法。根据材料目录中给定的材料范围及企业历年进料尺寸的规律，结合具体产品情况，选定一个最经济合理的材料尺寸，然后根据零件毛坯和下料切口尺寸，在选定尺寸的材料上排列，将最后剩余的残料（不能利用的）分摊到零件的材料消耗定额中。该方法适用于成批生产的产品。

② 下料利用率法。先根据材料规格，定出组距，经过综合套裁下料的实际测定，分别求出各种材料规格组距的下料利用率，然后用下料利用率计算零件材料消耗工艺定额。

③ 下料残料率法。先按材料定出组距，经过下料综合套裁的实际测定，分别求出各种材料规格组距的下料残料率，然后用下料残料率计算零件材料消耗工艺定额。

④ 材料综合利用法。当同一规格的某种材料可用一种产品的多种零件或用于多种产品的零件上时，可采用更广泛的套裁，在这种情况下利用综合利用法计算零件材料消耗定额比较合理。

(3) 填写产品材料消耗定额明细表。

(4) 汇总单台产品各个品种、规格的材料消耗定额。

(5) 计算单台产品材料利用率。

(6) 填写单台产品材料消耗工艺定额汇总表。

(7) 审核、批准。

## 2. 劳动消耗工艺定额（简称劳动定额）

任何生产过程都需要花费一定劳动，耗费一定时间，凡能计算考核工作量的工种和岗位均应制定劳动定额。劳动定额分时间定额（工时定额）和产量定额。

制定劳动定额的基本要求是根据本企业的生产技术条件，使大多数职工经过努力都可达到、部分先进职工可以超过，少数职工经过努力可以达到和接近的平均先进水平。

制定劳动定额的主要依据是产品图纸和工艺规程、生产类型、企业的生产技术水平、定额标准或企业的有关材料。劳动定额编制方法有：

(1) 经验估计法 由定额员、工艺员和工人相结合，通过总结过去的经验并参考有关技术资料，直接估计出劳动工时定额。

(2) 统计分析法 对企业过去一段时间内，生产类似零件（或产品）所实际消耗的工时原始记录，进行统计分析，并结合当前具体生产条件，确定该零件（或产品）的劳动定额。

(3) 类推比较法 以同类产品的零件或工序的劳动定额为依据，经过对比分析，推算出该零件或工序的劳动定额。

(4) 技术测定法 通过对实际操作时间的测定和分析，确定劳动定额。随着企业生产技术条件的不断改善，劳动定额应定期进行修改，以保持定额的平均先进水平。

## 第2章 电子设备可靠性设计

### 2.1 电子设备可靠性基础

电子设备可靠性起源于第二次世界大战。1944年德国用V-2火箭袭击伦敦，有80枚火箭在起飞台上爆炸，还有一些掉进英吉利海峡，由此德国提出并运用了串联模型得出火箭系统可靠度。而美军运往亚洲、非洲的沙漠、高原、热带及亚热带地区作战的军事装备，由于材料、部件及整个产品对于环境条件的适应能力差，而产生腐蚀、发霉以及由于沙漠干热、沙尘等的作用，使军事装备发生许多故障，机件失灵、甚至完全丧失战斗能力。例如，美国运往远东的航空无线电设备有60%不能工作，在规定使用期内仅有30%的时间能有效工作；因可靠性问题损失飞机2.1万架，是被击落飞机的1.5倍。英国的雷达，在欧洲时MTBF为116小时，在地中海时为61小时，在东南亚仅为18小时。由此引发人们对可靠性问题的认识与思考，通过大量现场调查和故障分析，采取对策，于是诞生了可靠性这门学科。

20世纪40年代是电子设备可靠性的萌芽时期。这一时期，主要通过现场调查、统计、分析，重点解决电子管可靠性问题。

20世纪50年代，美军在朝鲜战场，由于不适应寒冷气候，80%的电子设备发生了故障，对当时美军的战斗行动造成了很大困难。1952年美国成立了电子设备可靠性咨询组并于1957年发表了《军用电子设备可靠性》的研究报告，规定：一个电子产品企业如果没有可靠性机构，就不能接受国防部订货。该报告成为可靠性发展的奠基性文件，是可靠性发展的重要里程碑。

20世纪60年代是可靠性工程全面发展时期，形成了一套较为完善的可靠性设计、试验和管理标准，如MIL-HDBK-217、MIL-STD-781、MIL-STD-785；并开展了故障模式及影响分析与失效树分析（FTA）工作。在这十年中美、法、日、前苏联等工业发达国家相继开展了可靠性工程技术研究工作。

20世纪70年代是可靠性发展成熟时期，建立了可靠性管理机构，制定了一整套管理方法及程序。美国空军飞机灾难性事故从20世纪40年代中期的每10万飞行小时发生50次，下降到70年代初期的每10万飞行小时3次，30年中下降了94%。

20世纪80年代是可靠性向更深更广方向发展时期，可靠性工作地位提高，CAD技术在可靠性领域中应用，开展软件可靠性、机械可靠性及光电器件和微电子器件可靠性等的研究。

20世纪90年代至今可靠性步入理念更新时期，出现了新的可靠性理念，改变了一些传统的可靠性工作方法，一些经典理论也在被修改。同时，可靠性已成为质量保证体系的一部分，其地位日趋重要。

#### 2.1.1 电子设备可靠性的内涵

##### 2.1.1.1 可靠性的概念

国际电工技术委员会 IEC（International Electrotechnical Commission）对可靠性的定义：可靠

性是指设备在规定的时间内和规定的条件下，完成规定功能的能力。在这里，设备是一个非限定性术语，可以是某个装备系统，也可以是组成系统中的某个部分乃至元器件等。在可靠性定义中“三个规定”是很重要的。

### （1）规定的功能

定义设备的可靠性，首先要定义和规定其功能。电视机的功能是接收电视台发出的电视信号，能看，能听；洗衣机洗衣服；雷达发现搜索目标，测出距离和方位；枪、炮射击……这些是设备的规定功能。许多设备规定的功能并不是单一的，而是多种多样的。显然，工厂制造出来的合格设备本来是具有完成规定功能的能力的，但如果出了故障，坏了，就不能完成规定的功能；可靠性就是要设备不出毛病，能完成规定功能。但是应当强调，一是规定的功能是指按设备技术文件中规定的功能。电视机能看见图像、能听见声音，而图像“跳舞”，噪声大就失去了规定功能；二是功能应指规定的全部功能，而不是其中的部分功能，即要注意设备功能的多样性；三是规定功能还应包括故障或完成功能的判断准则，如枪、炮不是打响就合格，弹着点散布大到一定程度就不能完成规定功能，但弹着点散布大到什么程度就算失去规定功能？应加以规定。

### （2）规定的时间

规定的时间是可靠性定义中的核心。因为离开时间就无可靠性可言，而规定时间的长短又随设备对象不同和使用目的不同而异。例如，火箭弹要求在几秒或几分钟内可靠地工作；地下电缆、海底电缆系统则要求几十年内可靠地工作。设备的规定时间，是广义的时间或“寿命单位”，它可以是使用小时数（如电视机、雷达、电动机等），行驶公里数（如汽车、坦克），射击发数（如枪、炮、火箭发射架），也可能是储存年月（如弹药、导弹等一次性使用而长期储存的设备）。

### （3）规定的条件

规定的条件是设备完成规定功能的约束条件。它包括多方面，如装备使用（工作）时所处的环境（指设备工作所处的环境温度、湿度、振动、风、沙、霉菌等）、运输、储存、维修保养和使用人员的条件等。这些条件对设备可靠性都会有直接的影响，在不同的条件下，同一设备的可靠性也不一样。例如，实验室条件与现场使用条件不一样，它们的可靠性有时可能相近，有时可能相差几十倍，所以不在规定条件下就失去了比较设备可靠性的前提。

设备在工作中，常常因各种偶然因素，如元器件突然损坏，应力（电负荷、温度、机械影响等）突然改变，维护或使用不当等的影响而失效。由于这些失效的原因具有偶然性，所以对某一个具体设备，在规定的条件和时间内能否完成规定的功能，是无法预先知道的，这是一个随机事件。但可以求出设备在规定的条件和时间内完成规定功能的概率，所以，设备的可靠性可以用概率的形式表示。

## 2.1.1.2 可靠性的分类

### （1）固有可靠性

固有可靠性，指设备内在的可靠性。影响固有可靠性的因素很多，对电子设备来说，主要有设备的复杂程度、电路和元器件的选择与应用、元器件原材料的品质、制造工艺、工作参数、机械结构和制造工艺等。必须指出，设备的固有可靠性在很大程度上依赖于元器件的可靠性。设备越复杂，所用的元器件越多，则设备的固有可靠性越低。

加工工艺必须保证设备元器件在加工过程中，不致受到热力的、机械的和电气的损伤。为保证印制电路板焊接质量和装接效率，应采用波峰焊接（Wave Soldering）工艺技术；元器件筛选应按筛选工艺操作，不应过温筛选，以免损伤元器件；采取必要的措施，保证设备表面不受机械损

伤和化学腐蚀；用必要的工艺装置来满足设备加工过程中的各种电气指标的测试要求，使之达到最佳状态，以免受电气的冲击或过载的影响。应当把可靠性设计与加工的可靠性密切配合起来，以保证设备的质量要求。

### (2) 使用可靠性

使用可靠性，指使用和维护人员对设备可靠性的影响，它包括使用与维护的程序及设备，操作方法的正确性以及其他人人为的因素。使用可靠性在很大程度上依赖于使用设备的人。熟练而正确地操作、及时地维护和保养，都能显著地提高使用可靠性。

我们知道，在实际工作中，设备出了故障就报废的比例不是很高，因此说设备寿命不能完全代表可靠性。设备出现故障，若能及时排除，仍能继续可靠地使用，通常把能够修复的设备的元器件和零、部件所具备的维修难易程度或性质视为维护保养性，也是可靠性的重要因素之一。

所谓可维修性是指设备零部件、元器件经过修理，使之维持可靠性而采取措施的难易程度。

### (3) 环境适应性

环境适应性，指设备所处的环境条件对可靠性的影响，它包括环境温度、湿度、气压、振动、冲击、霉菌以及储存和运输条件的影响。提高设备的环境适应性，主要是对设备采取各种有效的防护措施。

#### 2.1.1.3 可靠性与经济性的关系

设备的寿命周期可分为四个阶段：构思与初步设想、设计与研制、制造与生产、运行与维修。由前三个阶段可体现出设备的制造费用和用户的购置费用。最后一个阶段则体现了设备的使用价值，即设备的使用效果和使用期。用户的要求是以最低的购置费用在尽可能长的时间内得到可靠的使用效果，设备设计制造者的目标应是最大限度地满足用户的要求，达到电子设备的性能指标，并符合其使用条件。

为了提高设备的可靠性，就要在材料、工艺、设备和管理等方面采取相应措施，这就导致生产和科研费用的增加，但使用、维修费用却随着可靠性提高而降低，因而总的费用却不一定增加。如果可靠性指标定得适当，总费用可达最低水平。若可靠性指标低，就必须增大使用和维修费用，总费用仍有可能增加，使经济遭受损失。它们的相互关系可参见图 2-1。

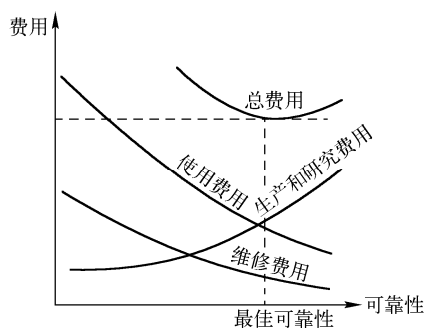


图 2-1 可靠性与经济性的关系曲线

#### 2.1.1.4 可靠性技术指标

##### 1. 可靠度（不失效率）

可靠度是指设备在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的概率，通常用  $R(t)$  表示。其物理意义是：在试验总数中扣除设备故障数，即到某个试验期时，仍然完好的设备数与试验设备总数的比例，即完好设备（不失效）的概率。由于  $R(t)$  是一个概率，其值为

$$0 < R(t) < 1 \quad (2-1)$$

在试验开始时， $R(0)=1$ ，设备全部完好。随着试验期的延长， $R(t)<1$ ，即出现了失效设备。试验一直延续下去，直到  $R(\infty)=0$ ，设备全部到达寿命终止期。因此， $R(t)$  越接近于 1，表示可靠度越大。

## 2. 故障率

故障率是指设备在规定条件下和规定时间内,失去规定功能的概率。通常用  $F(t)$  表示。它与可靠度是对立事件。二者关系是:

$$F(t)+R(t)=1 \quad (2-2)$$

因此,  $F(t)$  越接近于 1, 表示设备故障率越高。

## 3. 平均寿命

对于不可修复的和可修复的设备,其平均寿命有不同含义。对不可修复的设备,它是指设备发生故障前的工作或存储时间的平均值,记作 MTTF。

$$\text{MTTF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (2-3)$$

式中  $N$  为试验样品数;  $T_i$  为第  $i$  个设备无故障工作时间。

对可修复的设备而言,平均寿命是指两次相邻故障间隔时间的平均值,即平均无故障工作时间,记作 MTBF。

$$\text{MTBF} = \frac{T}{n} \quad (2-4)$$

式中  $T$  为总运行时间;  $n$  为故障的次数。

## 4. 失效率 (瞬时失效率)

失效率是指设备工作到  $t$  时刻后的一个单位时间内的失效数与在  $t$  时刻尚能正常工作的设备数之比,用  $\lambda(t)$  表示,即

$$\lambda(t) = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{[N - n(t)]\Delta t} \quad (2-5)$$

式中  $N$  为试验样品数;  $n(t)$  为到时刻  $t$  时的失效数;  $n(t+\Delta t)$  为  $t$  时刻后,在  $\Delta t$  时间间隔内失效数。

$\lambda(t)$  用百分数表示,失效率越低,设备的可靠性越高。100 万个元件工作 1 000h 后,出现 1 个失效元件,称为 1 菲特。

## 5. 平均修复时间

平均修复时间是指平均一次故障所需要的修复时间,记作 MTTR。

$$\text{MTTR} = T_R/n \quad (2-6)$$

式中  $T_R$  为修复时间总和;  $n$  为故障次数。

上述可靠性参量,对于不同类型的设备的评定各有所长,一般以实际使用方便为准则。对于复杂的设备,往往采用平均寿命加以衡量,因为该类设备不可能有大量的设备进行试验,所以很难统计它的失效率或可靠度。

### 2.1.2 电子元器件及其可靠性

电子元器件是在电路中具有独立电气功能的基本单元。元器件在各类电子设备中占有重要的地位,特别是通用电子元器件,如电阻器、电容器、电感器、晶体管、集成电路和开关、接插件等,更是电子设备中必不可少的基本材料。

电子元器件总的发展趋向是集成化、微型化、提高性能、改进结构。近几十年来,电子工业的迅速发展,不断对元器件提出新的要求;而元器件制造厂商也在不断研究并采用新的材料、新的工艺。通常,对电子元器件的主要要求是可靠性高、精确度高、体积微小、性能稳定、符合使



用环境条件等。

电子元器件可以分为有源元器件和无源元器件两大类。有源元器件在工作时,其输出不仅依靠输入信号,还要依靠电源,或者说,它在电路中起到能量转换的作用。例如,晶体管、集成电路等就是最常用的有源元器件。无源元器件一般又可以分为耗能元件、储能元件和结构元件三种。电阻器是典型的耗能元件;储存电能的电容器和储存磁能的电感器属于储能元件;接插件和开关等属于结构元件。这些元器件各有特点,在电路中起着不同的作用。通常,称有源元器件为“器件”,称无源元器件为“元件”。

### 2.1.2.1 电子元器件基础

#### 1. 固定电阻器

物体对通过其电流的阻碍作用称为电阻,不同材料的物体对电流的阻碍作用是不同的。它与物体材料的性质有关,同时电阻  $R$  还与物体的长度  $L$  呈正比,而与横截面积呈反比。利用这种阻碍作用做成的元件称为电阻器,简称电阻,在电路中用英文符号  $R$  表示。

电阻的度量单位是欧姆,用字母  $\Omega$  表示。并且规定电阻两端加  $1V$  电压、通过它的电流为  $1A$ ,则定义该电阻的值为  $1\Omega$ 。实际应用中常用  $k\Omega$  和  $M\Omega$  来表示。它们之间的换算关系是

$$1M\Omega = 1\,000k\Omega = 1\,000\,000\Omega \quad (2-7)$$

固定电阻器是指电阻值不能调节的电阻器,用电阻率较大的材料制成,是一种耗能元件。在电路中的主要作用为分流、限流、分压、偏置等。

##### (1) 电阻器的分类

电阻器的种类很多,常见的有下列几种分类。

##### ① 按制造材料分。

a. 线绕电阻(型号:RX)。在磁管上用锰铜丝或镍铬合金丝绕制后,为防潮并防止线圈松动,将其外层用披釉(玻璃釉或珐琅)或漆加以保护。

线绕电阻可分为精密型和功率型两类。精密型线绕电阻特别适用于测量仪表或其他高精度的电路,它的一般精度为  $\pm 0.01\%$ ,最高可达到  $\pm 0.005\%$  以上,温度系数小于  $10^{-6}/^{\circ}C$ ,长期工作稳定可靠,阻值范围是  $0.1\Omega \sim 5M\Omega$ 。功率型线绕电阻的额定功率在  $2W$  以上,最大功率可达  $500W$ ;阻值范围是  $0.1\Omega \sim 1M\Omega$ ,精度等级为  $\pm 5\% \sim \pm 20\%$ 。

由于采用线绕工艺,因而线绕电阻的自身电感和分布电容都很大,不适宜在高频电路中使用。

b. 薄膜电阻器。用蒸发的方法将具有一定电阻率的材料蒸镀于绝缘材料表面制成。

a) 碳膜电阻(型号:RT)。碳膜电阻是用结晶碳沉积在磁棒上或瓷管上制成的,改变碳膜的厚度和用刻槽的办法及变更碳膜长度可以得到不同的阻值。它的主要特点是成本低、高频特性好,阻值范围  $1\Omega \sim 10M\Omega$ ,温度系数为负值。额定功率为  $0.125 \sim 10W$ ,精度等级为  $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 。

b) 金属膜电阻(型号:RJ)。在陶瓷骨架表面,经真空高温或烧渗工艺蒸发沉积一层金属膜或合金膜。刻槽和改变金属膜的厚度可以精确控制阻值。其工作环境温度范围大( $-55 \sim +125^{\circ}C$ )、温度系数小、稳定性好、噪声低、体积小(与相同体积的碳膜电阻相比,额定功率要大一倍左右),价格比碳膜电阻稍贵一些。

这种电阻广泛用在仪器仪表及通信设备中稳定性及可靠性有较高要求的电路中,额定功率有  $0.125W$ 、 $0.25W$ 、 $0.5W$ 、 $1W$ 、 $2W$ 、 $5W$  等,标称阻值在  $1\Omega \sim 100M\Omega$  之间,精度可达  $0.5\% \sim 0.05\%$ 。

c) 金属氧化膜电阻 (型号: RY)。高温条件下, 在陶瓷本体的表面上以化学反应形式生成以二氧化锡为主体的金属氧化层。膜层比金属膜和碳膜电阻都厚得多, 并与基体附着力强, 因而它有极好的脉冲、高频、温度和过负荷性能; 机械性能好, 坚硬、耐磨; 在空气中不会再氧化, 因而化学稳定性好; 功率可达  $25\text{W} \sim 50\text{kW}$ 。但阻值范围较窄 ( $1\Omega \sim 200\text{k}\Omega$ )。

d) 合成膜电阻 (型号: RH)。合成膜电阻可制成高压型和高阻型。高压型的外形大多是一根无引线的电阻长棒, 表面涂红色; 耐压高的, 其长度也 longer。阻值范围是  $47 \sim 1\,000\text{M}\Omega$ , 精度等级为  $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ , 耐压分成  $10\text{kV}$  和  $35\text{kV}$  两挡。

高阻型的电阻体封装在真空玻璃管内, 来防止合成膜受潮或氧化, 以提高阻值的稳定性。阻值范围为  $10\text{M}\Omega \sim 10\text{T}\Omega$ , 允许偏差为  $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 。

c. 实心电阻 (型号: RS)。实心碳质电阻器用碳质颗粒、填料和黏合剂混合制成一个实体的电阻器。体积大小与相同功率的金属膜电阻相当。阻值范围是  $4.7\Omega \sim 200\text{M}\Omega$ , 精度等级为  $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 。价格低廉, 但其噪声电压大, 稳定性差, 目前较少用。

d. 金属玻璃釉电阻 (型号: RI)。将金属粉和玻璃釉粉混合, 采用丝网印刷法印在基板上。耐潮湿, 高温, 温度系数小, 主要应用于厚膜电路。片状电阻是金属玻璃釉电阻的一种形式, 电阻体是高可靠的钎系列玻璃釉材料经过高温烧结而成, 电极采用银钎合金浆料。体积小, 精度高, 稳定性好, 由于其为片状元件, 所以高频性能好。

e. 水泥电阻。水泥电阻实际上是封装在陶瓷外壳里、并用水泥填充固化的一种线绕电阻, 如图 2-2 所示。水泥电阻内的电阻丝和引脚之间采用压接工艺, 如果负载短路, 压触点会迅速熔断, 起到保护电路的作用。水泥电阻功率大、散热性好, 是具有良好的阻燃、防爆特性和阻值高达  $100\text{M}\Omega$  的绝缘电阻, 被广泛使用在开关电源和功率输出电路中。

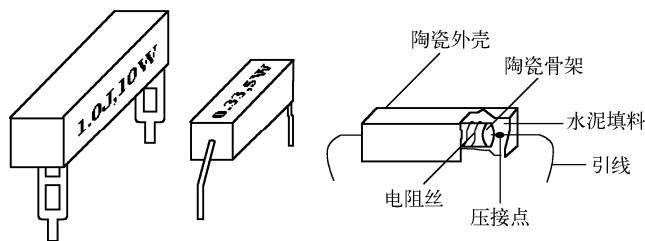


图 2-2 水泥电阻

## ② 按用途分。

a. 普通型。指能适应一般技术要求的电阻, 额定功率范围为  $0.05 \sim 2\text{W}$ , 阻值为  $1\Omega \sim 22\text{M}\Omega$ , 允许偏差  $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$  等。

b. 精密型。有较高精密度及稳定性, 功率一般不大于  $2\text{W}$ , 标称值在  $0.01\Omega \sim 20\text{M}\Omega$  之间, 精度在  $\pm 2\% \sim \pm 0.001\%$  之间分挡。

c. 高频型。电阻自身电感量极小, 常称为无感电阻。用于高频电路, 阻值小于  $1\text{k}\Omega$ , 功率范围宽, 最大可达  $100\text{W}$ 。

d. 高压型。用于高压装置中, 功率在  $0.5 \sim 15\text{W}$  之间, 额定电压可达  $35\text{kV}$  以上, 标称阻值可达  $1\text{G}\Omega$ 。

e. 高阻型。阻值在  $10\text{M}\Omega$  以上, 最高可达  $10^{14}\Omega$ 。

f. 电阻网络 (电阻排)。综合掩膜、光刻、烧结等工艺技术, 在一块基片上制成多个参数、性能一致的电阻, 连接成电阻网络, 也称集成电阻。

随着电子装配密集化和元器件集成化的发展,电路中常需要一些参数、性能、作用相同的电阻。例如计算机检测系统中的多路 A/D、D/A 转换电路,往往需要多个阻值相同、精度高、温度系数小的电阻,选用分立元件不仅体积大、数量多,而且往往难以达到技术要求,而使用电阻网络则很容易满足上述要求。

g. 敏感电阻。使用不同材料及工艺制造的半导体电阻,具有对温度、光通量、湿度、压力、磁通量、气体浓度等非电物理量敏感的性质,这类电阻叫做敏感电阻。通常有热敏、压敏、光敏、湿敏、磁敏、气敏、力敏等不同类型的敏感电阻。利用这些敏感电阻,可以制作用于检测相应物理量的传感器及无触点开关。各类敏感电阻,按其信息传输关系可分为“缓变型”和“突变型”两种,广泛应用于检测和自动化控制等技术领域。

a) 压敏电阻。压敏电阻主要有氧化锌、碳化硅和氧化锌压敏电阻。

b) 湿敏电阻。由感湿层、电极、绝缘体组成。氯化锂湿敏电阻随湿度上升而电阻减小,缺点为测试范围小,特性重复性不好,受温度影响大。碳湿敏电阻缺点为低温灵敏度低,阻值受温度影响大,较少使用。氧化物湿敏电阻性能较优越,可长期使用,温度影响小,阻值与湿度变化呈线性关系。

c) 光敏电阻。大多数是由半导体材料制成的,利用半导体的光电特性使电阻器的阻值随入射光线强弱发生变化。当入射光线增强时电阻值会明显减小;当入射光减弱时,阻值会显著增大。

d) 气敏电阻。利用某些半导体吸收某种气体后发生氧化还原反应制成,主要成分是金属氧化物;主要品种有金属氧化物气敏电阻、复合氧化物气敏电阻、陶瓷气敏电阻等。

e) 力敏电阻。它是一种阻值随压力变化而变化的电阻。可制成各种力矩计、半导体话筒、压力传感器等。主要品种有硅力敏电阻器、硒碲合金力敏电阻器。相对而言,合金电阻器具有更高灵敏度。

f) 热敏电阻。电阻值会随着本体温度的变化呈现出阶跃性的变化,具有半导体特性。热敏电阻按照温度系数的不同分为正温度系数热敏电阻(简称 PTC 热敏电阻)和负温度系数热敏电阻(简称 NTC 热敏电阻)。

超过一定的温度(居里温度)时,PTC 热敏电阻的电阻值随着温度的升高呈阶跃性地增高。一般情况下,有机高分子 PTC 热敏电阻适合过流保护用途,陶瓷 PTC 热敏电阻可适用于各种用途。

NTC 热敏电阻的电阻值随着温度的升高呈阶跃性地减小。NTC 热敏电阻是以锰、钴、镍和铜等金属氧化物为主要材料,采用陶瓷工艺制造而成的。温度低时,这些氧化物材料的载流子数目少,所以其电阻值较高;随着温度的升高,载流子数目增加,所以电阻值降低。

g) 熔断电阻器。又称熔丝电阻器,是一种具有熔丝及电阻器作用的双功能元件。在正常情况下具有普通电阻器的电阻功能,一旦电路出现故障时该电阻器因过负荷会在规定的时间内熔断开路,从而起到保护其他电路的作用。熔断电阻多为灰色,用色环或数字表示电阻。熔断电阻的熔断时间一般为 10s。熔断电阻器的常用型号有 RF10、RF11、RRD0910、RRD0911 等。RF10 型表面涂有灰色不燃涂料,其电阻值用色环表示。RF11 的阻值用字母表示,如 1W10 $\Omega$ 、2W1 $\Omega$ 等。也有的只标功率不标阻值。

与传统的熔断器和其他保护装置相比,熔断电阻器具有结构简单、使用方便、熔断功率小、熔断时间短等优点,被广泛用于电子设备中。选用熔断电阻要仔细考虑功率和阻值的大小,功率和阻值都不能太大,否则难以使它起到保护作用。

h) 磁敏电阻。磁敏电阻是利用磁电效应能改变电阻器阻值的原理制成的。其阻值会随穿过它的磁通量密度的变化而变化。它的显著特点是,在弱磁场中阻值与磁场的关系呈平方率增加,并有很高的灵敏度。

几种常用电阻器的外形如图 2-3 所示。

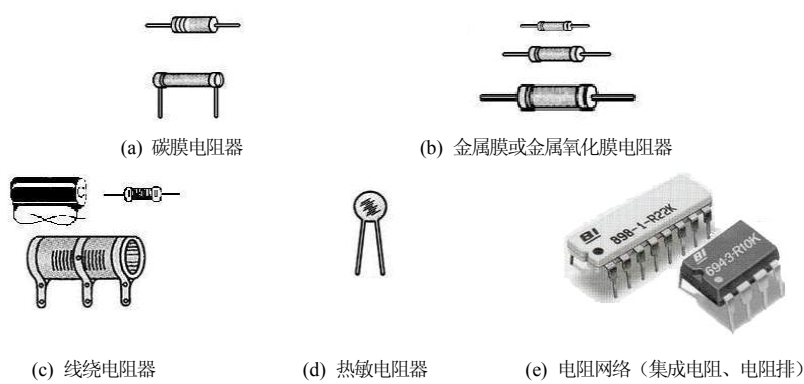


图 2-3 常用电阻器的外形

(2) 电阻器的主要技术参数

① 额定功率。在正常的大气压力 90~106.6kPa 及环境温度为-55~+70℃的条件下，电阻器长期工作所允许耗散的最大功率。不同类型的电阻器具有不同系列的额定功率，见表 2-1。

表 2-1 电阻器的额定功率

名 称	额定功率 (W)
实心电阻器	0.25、0.5、1、2、5
线绕电阻器	1/20、1/8、1/4、1/2、1、2、4、8、10、16、25、40、50、75、100、150、250、500
薄膜电阻器	0.025、1/20、1/8、1/4、1/2、1、2、5、10、25、50、100

一般来说，电阻器的功率越大，其体积也越大。在电路图中，电阻器的额定功率标志在电阻的图形符号上，如图 2-4 所示。

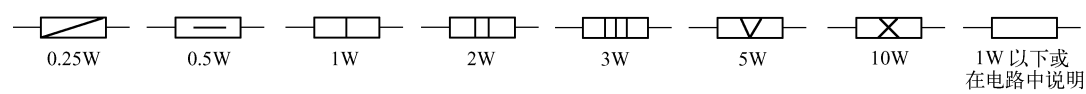


图 2-4 电阻器的额定功率图形符号

一般常用的 1/8W 电阻在电路图中不作标注，只用一个电阻符号表示。选用电阻时一般要求电阻额定功率为实际承受功率的 2 倍。

② 标称阻值。阻值是电阻器的主要参数之一，不同类型的电阻器，阻值范围不同；不同精度的电阻器其阻值系列亦不同。根据国家标准，常用的标称电阻值系列见表 2-2，表中数值再乘以  $10^n$ （其中  $n$  为整数），即为某一具体电阻器的阻值。E24、E12 和 E6 系列也适用于电位器和电容器。

表 2-2 常用的标称电阻值

标称值系列	精 度	电阻器 ( $\Omega$ )、电位器 ( $\Omega$ )、电容器 (pF) 标称值
E24	$\pm 5\%$	1.0 1.1 1.2 1.3 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.7 3.0 3.3 3.6 3.9 4.3 4.7 5.1 5.6 6.2 6.8 7.5 8.2 9.1
E12	$\pm 10\%$	1.0 1.2 1.5 1.8 2.2 2.7 3.3 3.9 4.7 5.6 6.8 8.2
E6	$\pm 20\%$	1.0 1.5 2.2 3.3 4.7 6.8 8.2

③ 允许误差。标称阻值与实际阻值的差值跟标称阻值之比的百分数称为阻值偏差，它表示

电阻器的精度。允许误差等级见表 2-3。

表 2-3 允许误差等级

允许误差 (%)	±0.001	±0.002	±0.005	±0.01	±0.02	±0.05	±0.1
等级符号	E	X	Y	H	U	W	B
允许误差 (%)	±0.2	±0.5	±1	±2	±5	±10	±20
等级符号	C	D	F	G	J (I)	K (II)	M (III)

④ 最高工作电压。允许的最大连续工作电压。在低气压工作时，最高工作电压较低。

⑤ 温度系数。温度每变化 1℃所引起的电阻值的相对变化。温度系数越小，电阻的稳定性越好。阻值随温度升高而增大的为正温度系数；反之为负温度系数。

⑥ 老化系数。电阻器在额定功率长期负荷下，阻值相对变化的百分数，它是表示电阻器寿命长短的参数。

⑦ 电压系数。在规定的电压范围内，电压每变化 1V，电阻器的相对变化量。

⑧ 噪声。噪声是产生于电阻中的一种不规则的电压起伏，如图 2-5 所示。噪声包括热噪声和电流噪声两种。热噪声是由于电子在导体中的不规则运动而引起的，既不决定于材料，也不决定于导体的形状，仅与温度和电阻的阻值有关。任何电阻都有热噪声，降低电阻的工作温度，可以减小热噪声。

电流噪声是由于导体流过电流时，导电颗粒之间以及非导电颗粒之间不断发生碰撞而产生的机械振动，并使颗粒之间的接触电阻不断变化的结果。当直流电压加在电阻两端时，电流将被起伏的噪声电流所调制，这样，电阻两端除了有直流压降外，还会有不规则的交变电压分量，这就是电流噪声。电流噪声与电阻的材料、结构有关，并和外加直流电压成正比。合金型电阻无电流噪声，薄膜型较小，合成型最大。

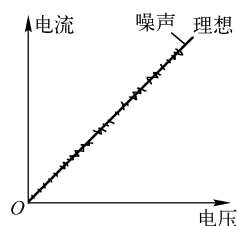


图 2-5 电阻的噪声

(3) 电阻器的材料、分类代号及含义 (见表 2-4)

表 2-4 电阻器的材料、分类代号及含义

材 料		分 类					
字 母 代 号	含 义	数 字 代 号	含 义		字母代号	含 义	
			电阻器	电位器		电阻器	电位器
T	碳膜	1	普通	普通	G	高功率	—
H	合成膜	2	普通	普通	T	可调	—
S	有机实心	3	超高频	—	W	—	微调
N	无机实心	4	高阻	—	D	—	多圈
J	金属膜	5	高温	—	说明：新型设备的分类根据发展情况予以补充		
Y	金属氧化膜	6	—	—			
C	化学沉积膜	7	精密	精密			
I	玻璃釉膜	8	高压	函数			
X	线绕	9	特殊	特殊			

(4) 电阻器主要技术参数的标志方法

电阻器的标称阻值和误差通常都标在电阻器上，标志方法有以下几种。

① 直标法。将参数直接标在电阻体上。例如，8k2 为 8.2kΩ；这是目前广泛采用的方法。这

种方法规定阻值的整数部分写在阻值单位标志符号的前面，阻值的小数部分写在阻值标志符号的后面。在稍大一些的电阻体上还可以写上电阻的型号及参数。例如，RTX1-7.5k±5%表示小型碳膜电阻器，阻值 7.5kΩ，精度±5%等。

② 色标法。它以电阻体上所标色环的颜色表示阻值和误差。普通电阻用四环：第一、第二环表示有效数字；第三环表示倍乘；第四环表示误差。精密电阻用五环表示：第一、第二、第三环表示有效数字；第四环表示倍乘；第五环表示误差。色环的标志符号参阅表 2-5。

表 2-5 电阻的色标位置和倍率关系

颜 色	有 效 数 字	乘 数	允 许 偏 差	颜 色	有 效 数 字	乘 数	允 许 偏 差
棕	1	$\times 10$		灰	8	$\times 10^8$	±5%
红	2	$\times 10^2$		白	9	$\times 10^9$	±10%
橙	3	$\times 10^3$		黑	0	$\times 1$	±20%
黄	4	$\times 10^4$		金		$\times 10^{-1}$	
绿	5	$\times 10^5$		银		$\times 10^{-2}$	
蓝	6	$\times 10^6$		无色			
紫	7	$\times 10^7$					

③ 数码表示法。它是在电阻器上用三位数码表示标称值的标志方法。数码从左至右，第一、第二位为有效值，第三位为乘数，即零的个数，单位为Ω。误差通常采用文字符号 J（±5%）、K（±10%）表示。数标法主要用于贴片等小体积的电路，例如，472 表示  $47 \times 100\Omega$ （即 4.7kΩ）；104 则表示 100kΩ。

2. 电位器

电位器也称可调电阻器，其图形符号和外形如图 2-6 所示。电位器有三个引出端：其中两个引出端为固定端，固定端之间的电阻值是固定的；另一个是滑动端（也称中心抽头），滑动端可以在固定端之间的电阻体上做机械运动，使其与固定端之间的电阻发生变化。把输入电压加在两个固定端之间，在滑动端与一个固定端之间就能得到对输入电压的分压，调整滑动端在两个固定端之间的机械位置，就可以改变相应的输出电位（见图 2-6（a））。当滑动端与一个固定端直接

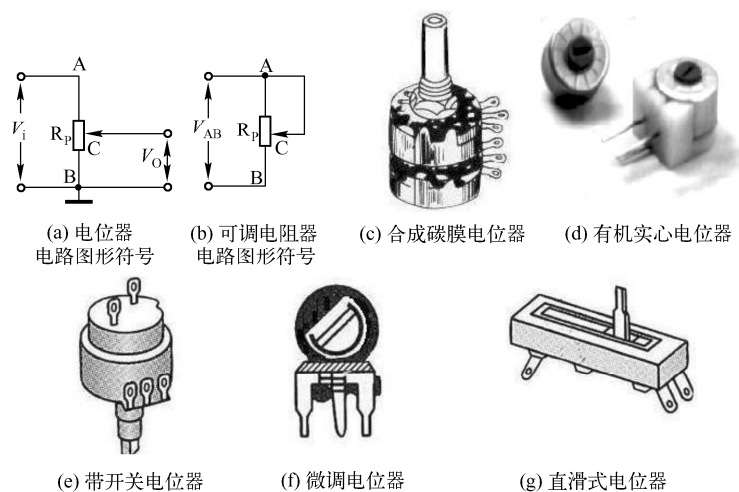


图 2-6 电位器的图形符号及外形

连接时, 电位器就成为可调电阻器, 调整滑动端在两个固定端之间的机械位置, 两个固定端之间的电阻也被改变, 常用来调节电路中某一支路的电阻值 (见图 2-6 (b))。可见, 因为接入电路的方式不同, 才有了电位器和可调电阻器这两种名称。习惯上, 把滑动端带有手柄、易于调节的称为电位器, 把不带手柄、调节不方便的叫做可调 (微调) 电阻器。

### (1) 电位器类别

电位器可按用途、材料、结构特点、阻值变化规律、驱动机构的运动方式等因素进行分类。常见的电位器种类见表 2-6。

表 2-6 接触式电位器分类

分 类 形 式			举 例
材 料	合金型	线绕	线绕电位器（WX）
		金属箔	金属箔电位器（WB）
	薄膜型		金属膜电位器（WJ），金属氧化膜电位器（WY），复合膜电位器（WH），碳膜电位器（WT）
	合成型	有机	有机实心电位器（WS）
		无机	无机实心电位器，金属玻璃釉电位器（WI）
	导电塑料		直滑式（LP），旋转式（CP）
用 途			普通，精密，微调，功率，专用（高频，高压，耐热）
阻值变化规律		线性	线性电位器（X）
		非线性	对数式（D），指数式（Z），正、余弦式
结构特点			单圈，多圈，单联，多联，带推拉开关，带旋转开关，锁紧式
调节方式			旋转式，直滑式

### (2) 电位器的主要技术指标

① 标称阻值。标在电阻上的名义阻值称为标称阻值, 其系列与电阻器的阻值标称系列相同。根据不同的精度等级, 实际阻值与标称阻值的允许偏差范围为  $\pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 1\%$ , 精密电位器的精度可达到  $\pm 0.1\%$ 。

② 额定功率。它是指两个固定端之间允许耗散的最大功率。一般电位器的额定功率系列为 0.063W、0.125W、0.25W、0.5W、0.75W、1W、2W、3W; 线绕电位器的额定功率比较大, 有 0.5W、0.75W、1W、1.6W、3W、5W、10W、16W、25W、40W、63W、100W。应该特别注意, 电位器的固定端附近容易因为电流过大而烧毁, 滑动端与固定端之间所能承受的功率要小于电位器的额定功率。

③ 滑动噪声。当电刷在电阻体上滑动时, 电位器中心端与固定端之间的电压出现无规则的起伏, 这种现象称为电位器的滑动噪声。它是由材料电阻率分布不均匀性以及电刷滑动时接触电阻的无规律变化引起的。

④ 分辨率。对输出量可实现的最精细的调节能力。线绕电位器的分辨率较差。

⑤ 机械零位电阻。当电位器的滑动端处于机械零位时, 滑动端与一个固定端之间的电阻应该是零。但由于接触电阻和引出电阻的影响, 机械零位的电阻一般不是零。在某些应用场合, 必须选择机械零位电阻小的电位器种类。

⑥ 阻值变化规律。调整电位器的滑动端, 其电阻值按照一定规律变化, 如图 2-7 所示。常见电位器的阻值变化规律有线性变化 (X 型)、指数变化 (Z 型) 和对数变化 (D

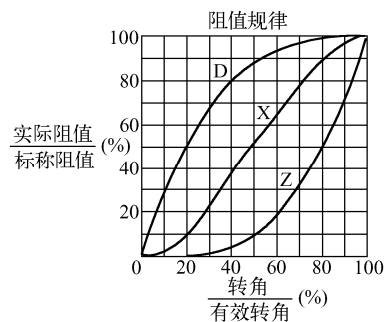


图 2-7 阻值变化规律

型)。根据不同需要,还可制成按照其他函数(如正弦、余弦)规律变化的电位器。

⑦ 启动力矩与转动力矩。启动力矩是指转轴在旋转范围内启动时所需的最小力矩,转动力矩是指转轴维持匀速旋转时所需的力矩,这两者相差越小越好。在自控装置中与伺服电机配合使用的电位器,要求启动力矩小,转动灵活;而用于电路调节的电位器,则其启动力矩和转动力矩都不应该太小。

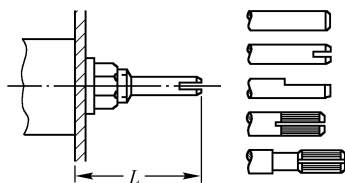


图 2-8 电位器的轴长与轴端结构

⑧ 电位器的轴长与轴端结构。指从安装基准面到轴端的尺寸。轴长尺寸系列有 6mm、10mm、12.5mm、16mm、25mm、30mm、40mm、50mm、63mm、80mm; 轴的直径系列有 2mm、3mm、4mm、6mm、8mm、10mm。常用电位器的轴端结构是根据调节旋钮的要求确定的,有光轴的、开槽的、滚花的、单平面或双平面的等多种形式。电位器的轴长与轴端结构如图 2-8 所示。

### (3) 几种常用电位器

① 线绕电位器(型号: WX)。用合金电阻线在绝缘骨架上绕制成电阻体,中心抽头的簧片在电阻丝上滑动。可制成精度达 $\pm 0.1\%$ 的精密线绕电位器和额定功率达 100W 的大功率线绕电位器。线绕电位器有单圈、多圈、多联等几种结构。

根据用途,可制成普通型、精密型、微调型线绕电位器;根据阻值变化规律,有线性、非线性(如对数或指数函数)两种。线性电位器的精度易于控制,稳定性好,电阻的温度系数小、噪声小、耐压高,但阻值范围较窄,一般在几欧到几十千欧之间。

② 合成碳膜电位器(型号: WTH)。在绝缘基体上涂覆一层合成碳膜,经加温聚合后形成碳膜片,再与其他零件组合而成,其外观如图 2-6(c)所示。阻值变化规律有线性和非线性的两种,轴端结构分为带锁紧与不带锁紧的两种。这类电位器的阻值变化连续,分辨率高,阻值范围 100 $\Omega$ ~5M $\Omega$ ;对温度和湿度的适应性较差,使用寿命较短。但由于成本低,因而广泛用于电视机等消费类电子设备中。额定功率有 0.125W、0.5W、1W、2W 等,精度一般为 $\pm 20\%$ 。

③ 有机实心电位器(型号: WS)。由导电材料与有机填料、热固性树脂配制成电阻粉,经过热压,在基座上形成实心电阻体,其外形如图 2-6(d)所示。轴端尺寸与形状分为多种规格,有带锁紧和不带锁紧的两种。这类电位器的优点是结构简单、耐高温、体积小、寿命长、可靠性高;缺点是耐压稍低、噪声较大、转动力矩大。有机实心电位器多用于对可靠性要求较高的电子仪器中。阻值范围是 47 $\Omega$ ~4.7M $\Omega$ ,功率多在 0.25~2W 之间,精度有 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 几种。

④ 多圈电位器。它属于精密电位器,阻值调整可使转轴旋转多达 40 圈,因而精度高。当阻值需要在大量程内进行微量调整时,可选用多圈电位器。多圈电位器的种类也很多,有线绕型、块金属膜型、有机实心型等;调节方式也可分成螺旋(指针)式、螺杆式等不同形式。

⑤ 导电塑料电位器。用特殊工艺将 DAP(邻苯二甲酸二稀丙酯)电阻浆料覆在绝缘机体上,加热聚合成电阻膜,或将 DAP 电阻粉热塑压在绝缘基体的凹槽内形成的实心体作为电阻体。特点是平滑性好、耐磨性好、寿命长、动噪声小、可靠性极高、耐化学腐蚀,用于宇宙装置、导弹、飞机雷达天线的伺服系统等。

⑥ 金属玻璃釉电位器。用丝网印刷法按照一定图形,将金属玻璃釉电阻浆料涂覆在陶瓷基体上,经高温烧结而成。特点是阻值范围宽,耐热性好,过载能力强,耐潮、耐磨都很好;缺点是接触电阻和电流噪声大。

⑦ 金属膜电位器。其电阻体可由合金膜、金属氧化膜、金属箔等分别组成。特点是耐高温、温度系数小、动噪声小、平滑性好。



⑧ 带开关的电位器。有旋转式开关电位器、推拉式开关电位器、推推式开关电位器。数字电位器实际是数字控制的模拟开关加上一组电阻器构成的功能电路，外观看起来就是一片集成电路，其特性和应用方式与集成电路相同。

⑨ 预调式电位器。在电路中一旦调试好，用蜡封住调节位置，在一般情况下不再调节。

⑩ 双联电位器。有异轴双联电位器和同轴双联电位器。

除了上述各种接触式电位器以外，还有非接触式（如光敏、磁敏）电位器和数字电位器。非接触式电位器没有电刷与电阻体之间的机械性接触，因此克服了接触电阻不稳定、滑动噪声及断线等缺陷。

### 3. 电容器

电容器的基本结构是用一层绝缘材料（介质）间隔的两片导体。电容器是储能元件，当两端加上电压以后，极板间的电介质即处于电场之中。电介质在电场的作用下，原来的电中性不能继续维持，其内部也形成电场，这种现象叫做电介质的极化。在极化状态下的介质两边，可以储存一定量的电荷，储存电荷的能力用电容量表示。电容量的基本单位是法拉（F），常用单位是微法（ $\mu\text{F}$ ）和皮法（pF）。

$$1\text{F} = 10^6\mu\text{F} = 10^{12}\text{pF} \quad (2-8)$$

电容在电路中一般用“C”加数字表示（如C13表示编号为13的电容），主要应用于隔直、耦合、旁路、滤波、调谐回路、能量转换、控制电路等方面。

（1）电容器的分类（见表2-7）

① 按照结构分类。

a. 可变电容器（型号：CB）。可变电容器是由很多半圆形动片和定片组成的平行板式结构，动片和定片之间用介质（空气、云母或聚苯乙烯薄膜）隔

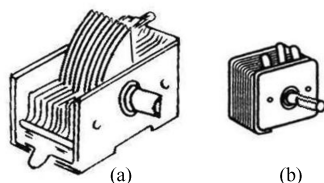


图2-9 小型可变电容器的外形

开，动片组可绕

轴相对于定片组旋转  $0^\circ \sim 180^\circ$ ，从而改变电容量的大小。可变电容器按结构可分为单联、双联和多联几种。图2-9是常见小型可变电容器的外形。双联可变电容器又分成两种，一种是两组最大容量相同的等容双联，另一种是两组最大容量不同的差容双联。目前最常见的小型密封薄膜介质可变电容器（CBM型），采用聚苯乙烯薄膜作为片间介质。

可变电容器主要用在需要经常调整电容量的场合，如收音机的频率调谐电路。单联可变电容器容量范围通常是  $7/270\text{pF}$  或  $7/360\text{pF}$ ；双联可变电容器最大容量通常为  $270\text{pF}$ 。

b. 微调电容器（CCW型）。在两块同轴的陶瓷片上分别镀有半圆形的银层，定片固定不动，旋转动片就可以改变两块银片的相对位置，从而在几十皮法的范围内改变容量，如图2-10所示。一般在高频回路

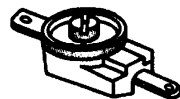


图2-10 微调电容器

表2-7 常用电容器的种类

固定式	有机介质	纸介	普通纸介	
			金属化纸介	
		有机薄膜	涤纶	
			聚碳酸酯	
			聚苯乙烯	
			聚四氟乙烯	
			聚丙烯	
			漆膜	
	无机介质	云母		
		陶瓷	瓷片	
			瓷管	
			独石	
		玻璃	玻璃膜	
			玻璃釉	
			独石	
		电解	铝电解	
	钽电解			
	铌电解			
可 变 式	可变：空气、云母、薄膜			
	半可变：瓷介、云母			

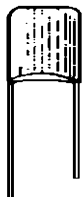


图 2-11 有机薄膜电容器

中用于不经常进行的频率微调。

② 按电解质分类。

a. 有机薄膜电容器。有机薄膜电容器如图 2-11 所示，性能比较见表 2-8。

表 2-8 各种有机薄膜电容器性能比较

种 类	聚酯（涤纶）	聚碳酸酯	金属化聚碳酸酯	聚丙烯	聚苯乙烯	聚四氟乙烯
型号	CL	CS	CSJ	CBB	CB	CF
容量范围	470pF~4.7μF	510pF~5μF	0.01~10μF	0.001~10μF	10pF~1μF	510pF~0.1μF
额定电压	63~630V	50~250V	50~500V	50V~2kV	63V~30kV	250V~1kV
损耗角正切值 $\tan\delta(\%)$	0.3~0.7	0.08~0.15	0.1~0.2	0.01~0.1	0.01~0.05	0.002~0.005
工作温度（℃）	-55~+125	-55~+125	-55~+125	-55~+85	-10~+80	-55~+200
温度系数（ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）	+200~+600	±200	±200	-300~-100	±200	-100~-200
用途	低频或直流电路	低压交直流电路	低压交直流电路	高压电路	高精度、高频	高温、高频

b. 无机介质电容器。用陶瓷、云母或玻璃等无机材料可制成无机介质电容器。

a) 瓷介电容器（型号：CC 或 CT）。瓷介电容器制造容易、成本低廉、安装方便。常见的低压小功率电容器有瓷片、瓷管、瓷介独石等类型，如图 2-12 所示。在陶瓷薄片两面喷涂银层并焊接引线，披釉烧结后就制成瓷片电容器；若在陶瓷薄膜上印刷电极后叠层烧结，就能制成独石电容器。独石电容器的单位体积比瓷片电容器小很多，为瓷介电容器向小型化和大容量的发展开辟了良好的途径。

高压大功率瓷介电容器可制成鼓形、瓶形、板形等形式。这种电容器的额定直流电压可达 30kV，容量范围是 470~6 800pF，通常用于高压供电系统的功率因数补偿。



图 2-12 瓷介电容器

由于所用陶瓷材料的介电性能不同，因而低压小功率瓷介电容器有高频瓷介（CC）、低频瓷介（CT）电容器之分。高频瓷介电容器的体积小、耐热性好、绝缘电阻大、损耗小、稳定性高，常用于要求低损耗和容量稳定的高频、脉冲、温度补偿电路，但其容量范围较窄，一般为 1pF~0.1μF；低频瓷介电容器的绝缘电阻小、损耗大、稳定性差，但重量轻、价格低廉、容量大，特别是独石电容器的容量可达 2μF 以上，一般用于对损耗和容量稳定性要求不高的低频电路。

b) 云母电容器（型号：CY）。以云母为介质，用锡箔和云母片（或用喷涂银层的云母片）层叠后在胶木粉中压铸而成。云母电容器如图 2-13 所示。由于云母材料优良的电气性能和机械性能，使云母电容器的自身电感和漏电损耗都很小，具有耐压范围宽、可靠性高、性能稳定、容量精度高等优点，被广泛用在一些具有特殊要求（如高温、高频、脉冲、高稳定性）的电路中。

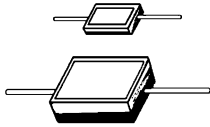


图 2-13 几种云母电容器

目前应用较广的云母电容器的容量一般为 4.7~51 000pF，精度可达到 ±0.01%~0.03%，这是其他种类的电容器难以做到的。云母电容器的直流耐压通常在 100V~5kV 之间，最高可达到 40kV。温度系数小，一般可达到  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  以内；可用于高温条件下，最高

环境温度可达到 460℃；长期存放后，容量变化小于 0.01%~0.02%。

但是，云母电容器的生产工艺复杂，成本高、体积大、容量有限，因此它的使用范围受到了一定的限制。

c) 玻璃电容器。它以玻璃为介质。目前常见的有玻璃独石电容器和玻璃釉独石电容器两种，其外形如图 2-14 所示。玻璃独石电容器与云母电容器的生产工艺相似，即把玻璃薄膜与金属电极交替叠合后热压成整体而成；玻璃釉独石电容器与瓷介独石电容器的生产工艺相似，即将玻璃釉粉压成薄膜，在膜上印刷图形电极，交替叠合后剪切成小块，在高温下烧结成整体。

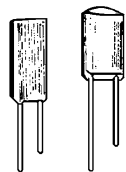


图 2-14 玻璃电容器

与云母和瓷介电容器相比，玻璃电容器的生产工艺简单，因而成本低廉。这种电容器具有良好的防潮性和抗振性，能在 200℃ 高温下长期稳定工作，是一种高稳定性、耐高温的电容器。其稳定性介于云母与瓷介电容器之间，一般体积却只有云母电容器的几十分之一，所以在高密度的 SMT 电路中广泛使用。

c. 电解电容器。它以金属氧化膜作为介质，以金属和电解质作为电容的两极，金属为阳极，电解质为阴极。使用电解电容器必须注意极性，由于介质单向极化的性质，它不能用于交流电路，极性不能接反，否则会影响介质的极化，使电容器漏液、容量下降，甚至发热、击穿、爆炸。

由于电解电容器的介质是一层极薄的氧化膜（厚度只有几纳米到几十纳米），因此比率电容（电容量/体积）比任何其他类型电容器的都要大。换言之，对于相同的容量和耐压，其体积比其他电容器都要小几个或几十个数量级，低压电解电容器的这一特点更为突出。在要求大容量的场合（如滤波电路等），均选用电解电容器。电解电容器的损耗大，温度特性、频率特性、绝缘性能都较差，漏电流可达毫安级，长期存放可能因电解液干涸而老化。因此，除体积小以外，其任何性能均远不如其他类型的电容器。常见的电解电容器有铝电解、钽电解和铌电解电容器。此外，还有一些特殊性能的电解电容器，如激光储能型、闪光灯专用型、高频低感型电解电容器等，用于不同要求的电路。

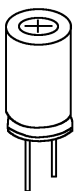


图 2-15 铝电解电容器的外形

a) 铝电解电容器（型号：CD）。一般它是用铝箔和浸有电解液的纤维带交叠卷成圆柱形后，封装在铝壳内制成的，其外形如图 2-15 所示。大容量的铝电解电容器的外壳顶端通常有“十”字形压痕，其作用是防止电容器内部发热引起外壳爆炸：假如电解电容器被错误接入电路，介质反向极化会导致内部迅速发热，电解液汽化，膨胀的气体就会顶开外壳顶端的压痕释放压力，避免外壳爆裂伤人。这是一种使用最广泛的通用型电解电容器，适用于电源滤波和音频旁路。铝电解电容器的绝缘电阻小，漏电损耗大，容量范围是 0.33~10 000μF，额定工作电压一般在 6.3~450V。

b) 钽电解电容器（型号：CA）。采用金属钽（粉剂或溶液）作为电解质。由于钽及其氧化膜的物理性能稳定，所以它与铝电解电容器相比，具有绝缘电阻大、漏电小、寿命长、比率电容大、长期存放性能稳定、温度及频率特性好等优点；但它的成本高、额定工作电压低（最高只有 160V）。这种电容器主要用于一些对电气性能要求较高的电路，如积分、计时、开关电路等。

钽电解电容器分为有极性和无极性的两种。除液体钽电容以外，近年来又发展了超小型固体钽电容器。高频片状钽电容器的最小尺寸可达 1mm×2mm，用于混合集成电路或采用 SMT 技术的微型电子设备中。

### ③ 按用途分。

a. 高频旁路。陶瓷电容器、云母电容器、玻璃膜电容器、涤纶电容器、玻璃釉电容器。

- b. 低频旁路。纸介电容器、陶瓷电容器、铝电解电容器、涤纶电容器。
- c. 滤波。铝电解电容器、纸介电容器、复合纸介电容器、液体钽电容器。
- d. 调谐。陶瓷电容器、云母电容器、玻璃膜电容器、聚苯乙烯电容器。穿心式或支柱式结构瓷介电容器的一个电极就是安装螺钉。引线电感极小，频率特性好，介电损耗小，有温度补偿作用；但不能做成大容量的，受振动会引起容量变化。
- e. 高频耦合。陶瓷电容器、云母电容器、聚苯乙烯电容器。
- f. 低频耦合。纸介电容器、陶瓷电容器、铝电解电容器、涤纶电容器、固体钽电容器。
- g. 小型电容。金属化纸介电容器、陶瓷电容器、铝电解电容器、聚苯乙烯电容器、固体钽电容器、玻璃釉电容器、金属化涤纶电容器、聚丙烯电容器、云母电容器。

(2) 电容器的主要技术参数

① 标称容量和允许偏差。电容量是电容器的基本参数，其数值标注在电容器体上。电容器的标称依所用介质材料不同而各成系列。无机介质及高频有机薄膜电容器容量的标称系列及允许偏差与电阻的 E24、E12、E6 系列相同。有机介质及低频有机薄膜电容器标称系列见表 2-9。

表 2-9 有机介质及低频有机薄膜电容器标称系列

允许偏差	$\pm 5\% \sim \pm 10\%$	$\pm 20\%$
电容范围	100pF~1μF	1μF~100μF
标称电容量系列值	1.0; 1.2; 1.5; 2.2; 2.4; 2.7; 3.3; 3.9; 4.3; 4.7; 5.6; 6.8	1.0; 2.0; 3.3; 4.0; 4.7; 6.8; 8.0 等

② 额定电压。在极化状态下，电荷受到介质的束缚而不能自由移动，只有极少数电荷摆脱束缚形成漏电流；当外加电场增强到一定程度，使介质被击穿，大量电荷脱离束缚流过绝缘材料，此时电容器已经遭到损坏。能够保证长期工作而不致击穿电容器的最大电压称为电容器的额定工

作电压，俗称“耐压”。额定电压系列随电容器种类不同而有所区别，额定电压的数值通常在体积较大的电容器或电解电容器上标出。电子设备常用的电容器的额定电压系列见表 2-10。

表 2-10 电容器的额定电压系列

电容类型	耐压 (V)
Y	100; 250; 500
I	40; 100; 250; 500
C	40; 60; 100; 150; 250; 500
J-CL	63; 100; 250; 400; 630
D	3; 6.3; 10; 16; 25; 32; 50; 150; 300; 450; 500

③ 绝缘电阻及漏电流。电容介质不可能绝对不导电，当电容加上直流电压时，电容器会有漏电流产生。若漏电流太大，电容器就会发热损坏。除电解电

容外，其他电容器的漏电流是极小的，故用绝缘电阻参数来表示其绝缘性能；而电解电容因漏电较大，故用漏电流表示其绝缘性能（与容量成正比）。直流电压加在电容上，并产生漏电电流，两者之比称为绝缘电阻。绝缘电阻越小越好。电容的绝缘电阻及漏电流是重要的性能参数，电子设备的故障有不少都是因某个电容漏电太大、击穿而造成的。

④ 损耗因数。它是有功损耗与无功损耗功率之比。通常在电场作用下，电容储存或传递的一部分电能会因介质漏电及极化作用而变为有害的热能，这部分发热消耗的能量就是电容的损耗，显然损耗越大，发热也越严重。各类电容都规定了其在某频率范围内的损耗允许值。

⑤ 频率特性。随着频率的上升，一般电容器的电容量呈现下降的规律。

⑥ 温度系数。用来评价电容器的温度稳定性，表示电容量随环境温度改变而变化：

$$\alpha_C = \frac{1}{C_0} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t} \times 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C}) \quad (2-9)$$

式中  $C_0$  为常温 ( $20 \pm 5$ )  $^\circ\text{C}$  下的电容量 (F);  $\Delta C$  (F) 为温度改变  $\Delta t$  ( $^\circ\text{C}$ ) 时对应的电容改变量。

云母及瓷介电容器的温度稳定性最好, 温度系数可达  $10^{-4}/^\circ\text{C}$  数量级, 铝电解电容器的温度系数最大, 可达  $10^{-2}/^\circ\text{C}$ 。多数电容器的温度系数为正值, 个别类型电容器 (如瓷介电容器) 的温度系数为负值。为使电路工作稳定, 电容器的温度系数越小越好。

### (3) 电容器型号

国产电容器的型号一般由四部分组成 (不适用于压敏、可变、真空电容器), 见表 2-11。

表 2-11 电容器型号命名法

第 1 部分：主称		第 2 部分：材料		第 3 部分：特征、分类						第 4 部分：序号	
符号	含义	符号	含义	符号	含 义						
					瓷介	云母	玻璃	电解	其他		
C	电 容 器	C	瓷介	1	圆片	非密封	—	箔式	非密封	对主称、材料相同，仅性能指标、尺寸大小有差别，但基本不影响互换使用的元件，给予同一序号；若性能指标、尺寸大小明显影响互换使用时，则在序号后面用大写字母作为区别代号	
		Y	云母	2	管形	非密封	—	箔式	非密封		
		I	玻璃釉	3	叠片	密封	—	烧结粉固体	密封		
		O	玻璃膜	4	独石	密封	—	烧结粉固体	密封		
		Z	纸介	5	穿心	—	—	—	穿心		
		J	金属化纸	6	支柱	—	—	—	—		
		B	聚苯乙烯	7	—	—	—	无极性	—		
		L	涤纶	8	高压	高压	—	—	高压		
		Q	漆膜	9	—	—	—	特殊	特殊		
		S	聚碳酸酯	J	金属膜						
		H	复合介质	W	微调						
		D	铝								
		A	钽								
		N	铌								
		G	合金								
T	钛										
E	其他										

### (4) 电容器参数的标志方法

电容器的标称容量及允许误差一般标在电容器上, 其方法可分为以下几种。

① 直标法。主要用在体积较大的电容上。标注的内容有多有少, 但一般标称容量、额定电压及允许偏差这3项参数大都必标注, 当然也有体积太小 (如小容量瓷介电容等) 的电容仅标容量一项 (往往连 pF 单位也省略)。标注较齐的电容通常有标称容量、额定电压、允许偏差、电容型号、商标、工作温度及制造日期等。

② 色码标示法。色码表示法与电阻器的色环标示法类似, 颜色涂于电容器的一端或从顶端向引线排列。色码一般只有3种颜色, 前两环为有效数字, 第3环为倍率, 单位为 pF。有时色环较宽, 如红、红、橙, 两个红色环涂成一个宽的, 表示 22 000pF。

③ 文字符号法。它是采用字母或数字或两者结合的方法来标注电容的主要参数。其中, 容量有两种标注法: 一是用数字和字母结合。如 10p 代表 10pF, 4.7μ 代表 4.7μF, 3p3 代表 3.3pF,

8n2 代表 8200pF 等。小数点往往用 p、n、 $\mu$ 、m 代替，与电阻标注中的 R、k 等相似。二是用 3 位数字表示，其中第一、第二位为有效数字位，表示容量值的有效数，第三位为倍率，表示有效数字后的零的个数，电容量的单位为 pF。如 203 表示容量为 20 000pF。

④ 数码表示法。一般用 3 位数字来表示容量的大小，单位为 pF。前两位为有效数字，后一位表示倍率，即乘以  $10^n$ ， $n$  为第三位数字，若第三位数字是 9，则乘  $10^{-1}$ 。如 223J 代表  $22 \times 10^3 \text{pF}$ ，允许误差为  $\pm 5\%$ ；又如 479k 代表  $47 \times 10^{-1} \text{pF}$ ，允许误差为  $\pm 5\%$  的电容。这种表示方法最为常见。电容容量误差见表 2-12。

表 2-12 电容容量误差

符号	F	G	J	K	L	M
允许误差 (%)	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 15$	$\pm 20$

值得指出的是，片状（贴片）电容一般没有标志，这与片状电阻不一样，需查电路图或相关资料手册才能知道其容量。

#### 4. 电感器

电感在电路中常用“L”加数字表示，如 L6 表示编号为 6 的电感。电感器是一种储存磁场能的元件。在电路中可阻交流、滤波、耦合；也可与电容器配合构成谐振电路，用来选频。

电感器是由线圈构成的，所以又称电感线圈。为了增加回路  $Q$  值，缩小体积，常将其绕在铁磁物质上。圈数越多，直径越大，长度与直径比越接近 1/10，其电感量越大。

##### (1) 电感器的分类

##### ① 按按电感量变化情况分类。

a. 小型固定电感器。其结构有卧式（LG1、LGX 型）和立式（LG2、LG4 型）两种，其外形如图 2-16 所示。这种电感器是在棒形、工字形或王字形的磁芯上直接绕制一定匝数的漆包线或丝包线，外表裹覆环氧树脂或封装在塑料壳中。有些环氧树脂封装的固定电感器用色码标注其电感量，故也称为色码电感。

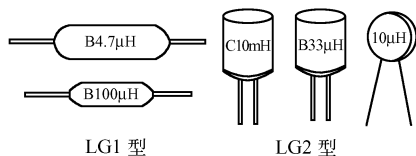


图 2-16 小型固定电感器

小型固定电感器的电感量范围一般为  $0.1\mu\text{H} \sim 10\text{mH}$ ，允许偏差有 I、II、III 三挡，分别表示  $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$  和  $\pm 20\%$ ； $Q$  值在 40~80 之间。额定电流用 A、B、C、D、E 挡表示，分别代表 50mA、150mA、300mA、700mA、1 600mA。显然，相同电感量的固定电感，A 挡的体积最小，E 挡的体积最大。小型固定电感器具有体积小、重量轻、结构牢固（耐振动、耐冲击）、防潮性能好、安装方便等优点，常用在滤波、扼流、延迟、陷波等电路中。

b. 中周线圈。其结构由磁芯、磁罩、塑料骨架和金属屏蔽壳组成，线圈绕制在塑料骨架上或直接绕制在磁芯上，骨架的插脚可以焊接到印制电路板上。有些中周线圈的磁罩可以旋转调节，有些则是磁芯可以旋转调节。调整磁芯或磁罩的相对位置，能够在  $\pm 10\%$  的范围内改变中周线圈的电感量。常用的中周线圈的外形结构如图 2-17 所示。

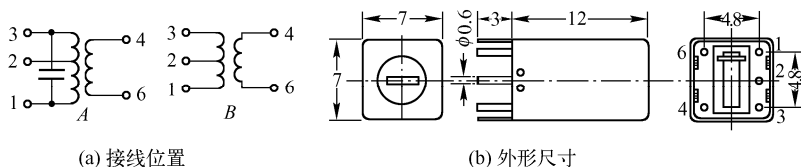


图 2-17 中周线圈

中周线圈是超外差式无线电设备中的主要元件之一，广泛应用在调幅、调频接收机、电视接收机、

通信接收机等电子设备的振荡调谐回路中。由于中周线圈的技术参数根据接收机的设计要求确定，并直接影响接收机的性能指标，所以各种接收机中的中周线圈的参数都不完全一致。

## ② 按导磁体性质分类。

a. 铁氧体磁芯线圈。铁氧体铁磁材料具有较高的磁导率，常用来作为电感线圈的磁芯来制造体积小而电感量大的电感器。用罐形铁氧体磁芯（见图 2-18（a））制作的电感器，因其具有闭合磁路，使有效磁导率和电感系数很高。如果在中心磁柱上开出适当的气隙，不但可以改变电感系数，而且能够提高电感的  $Q$  值、减小电感温度系数。罐形磁芯线圈广泛应用于 LC 滤波器、谐振回路和匹配回路。常见的铁氧体磁芯还有 I 形磁芯、E 形磁芯和磁环。I 形磁芯俗称磁棒，常用作无线电接收设备的天线磁芯，如图 2-18（b）所示；E 形磁芯见图 2-18（c），常用于小信号高频振荡电路的电感线圈；用铁氧体磁环（见图 2-18（d））绕制的电感线圈，多用于开关电源，作为高频扼流圈。

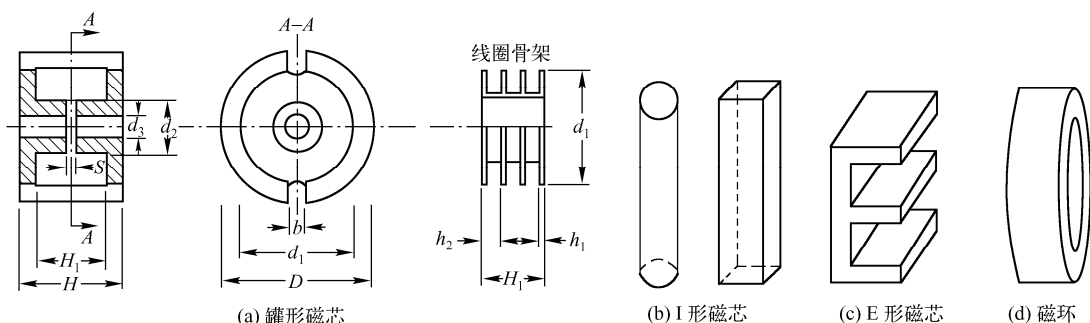


图 2-18 铁氧体磁芯

b. 铜芯线圈。铜芯线圈在超短波范围应用较多，利用旋动铜芯在线圈中的位置来改变电感量，这种调整比较方便、耐用。

## ③ 按工作性质分类。天线线圈、振荡线圈、扼流线圈、陷波线圈、偏转线圈。

高频扼流圈用于高频电路中阻止高频电流，提供低频通路。绕在高频磁芯上，为了减小分布电容常绕成蜂房式。低频扼流圈常用于直流电源滤波。采用矽钢片做磁芯。为防止直流磁化，磁路留有空气隙。

偏转线圈是电视机扫描电路输出级的负载，要求偏转灵敏度高、磁场均匀、 $Q$  值高、体积小、价格低。

## ④ 按绕线结构分类。

a. 平面电感。主要采用真空蒸发、光刻电镀及塑料包封等工艺，在陶瓷或微晶玻璃片上沉积金属导线制成，如图 2-19 所示。目前的工艺水平已经可以在  $1\text{cm}^2$  的面积上制作出电感量为  $2\mu\text{H}$  以上的平面电感。平面电感的稳定性、精度和可靠性都比较好，适用在频率范围为几十兆赫到几百兆赫的高频电路中。

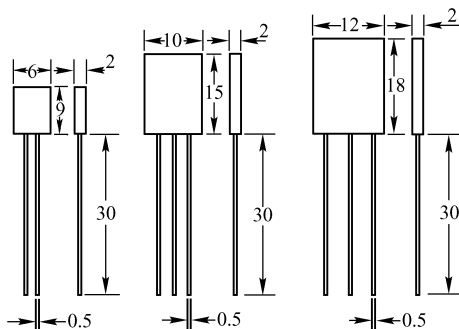


图 2-19 平面电感

b. 蜂房电感器。如果所绕制的线圈，其平面不与旋转面平行，而是相交成一定的角度，这种线圈称为蜂房式线圈。而其旋转一周，导线来回弯折的次数，常称为折点数。蜂房式绕法的优点是体

积小, 分布电容小, 而且电感量大。蜂房式线圈都是利用蜂房绕线机来绕制, 折点越多, 分布电容越小。

### (2) 电感器的主要技术参数

① 电感量。在没有非线性导磁物质存在的条件下, 一个载流线圈的磁通量  $\psi$  与线圈中的电流  $I$  成正比, 其比例常数称为自感系数, 用  $L$  表示, 简称电感。即

$$L = \psi / I \quad (2-10)$$

式中  $\psi$  为磁通量;  $I$  为电流。

电感的基本单位是 H (亨利), 实际常用单位有 mH (毫亨)、 $\mu$ H (微亨) 和 nH (毫微亨)。一般电感器的电感量精度在  $\pm 5\% \sim \pm 20\%$  之间。

② 感抗  $X_L$ 。感抗在电感元件参数表上一般查不到, 但它与电感量、品质因数  $Q$  等参数密切相关。由于电感线圈的自感电动势总是阻止线圈中电流的变化, 故线圈对交流电有阻力作用, 阻力大小就用感抗  $X_L$  表示, 单位为  $\Omega$ 。

$$X_L = 2\pi f L \quad (2-11)$$

式中  $f$  为交流电的频率 (Hz);  $L$  为线圈的电感量 (H)。

不难看出, 线圈通过低频电流时  $X_L$  小, 通过直流电时  $X_L$  为零, 此时仅线圈的直流电阻起阻力作用 (电感线圈的直流电阻很小, 可近似短路)。通过高频电流时  $X_L$  很大, 若  $L$  也大, 则可看作开路。

③ 品质因数 ( $Q$  值)。电感线圈的品质因数定义为

$$Q = \frac{2\pi f L}{r} \quad (2-12)$$

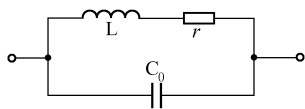
式中  $f$  为工作频率 (Hz);  $L$  为线圈的电感量 (H);  $r$  为线圈的损耗电阻 ( $\Omega$ ), 包括直流电阻、高频电阻及介质损耗电阻。

$Q$  值反映线圈损耗的大小,  $Q$  值越高, 损耗功率越小, 电路效率越高。一般谐振电路要求电感器的  $Q$  值高, 以便获得更好的选择性。为提高电感线圈的品质因数, 可以采用镀银导线、多股绝缘线绕制线匝, 使用高频陶瓷骨架及磁芯 (提高磁通量)。

④ 直流电阻。即电感线圈自身的直流电阻, 可用万用表直接测得。

⑤ 额定电流。电感线圈中允许通过的最大电流。当电感线圈在供电回路里作为高频扼流圈或在大功率谐振电路里作为谐振电感时, 都必须考虑它的额定电流是否符合要求。

⑥ 固有电容。电感线圈的各匝绕组之间通过空气、绝缘层和骨架而存在着分布电容; 同时, 在屏蔽罩之间、多层绕组的每层之间、绕组与底板之间也都存在着分布电容。这样, 电感器实际上可以等效成如图 2-20 所示的电路。



图中的等效电容  $C_0$ , 就是电感器的固有电容。由于固有电容的存在, 使线圈有一个固有频率或谐振频率, 记为  $f_0$ , 其值为

$$f_0 = 1 / (2\pi \sqrt{LC_0}) \quad (2-13)$$

图 2-20 电感器的等效电路

使用电感线圈时, 应使其工作频率远低于线圈的固有频率。

为了减小线圈的固有电容, 可以减小线圈骨架的直径, 用细导线绕制线圈, 或者采用间绕法、蜂房式绕法。

### (3) 电感器的标志方法

电感器的标志方法与电阻器、电容器的标志方法相同, 有直标法、文字符号法和色标法。例如, 棕、黑、金, 金表示  $1\mu$ H (误差  $5\%$ ) 的电感。



### 5. 晶体二极管

晶体二极管在电路中常用“D”加数字表示,如D5表示编号为5的二极管。二极管的主要特性是单向导电性,也就是在正向电压的作用下,导通电阻很小;而在反向电压作用下导通电阻极大或无穷大。正因为二极管具有上述特性,常把它用在整流、隔离、稳压、极性保护、编码控制、调频调制和静噪等电路中。

二极管的识别很简单,小功率二极管的N极(负极),在二极管外表大多采用一种色圈标出来,有些二极管也用二极管专用符号来表示P极(正极)或N极(负极),也有采用符号标志为“P”、“N”来确定二极管极性的。发光二极管的正负极可从引脚长短来识别,长脚为正,短脚为负。

用数字式万用表去测量二极管时,红表笔接二极管的正极,黑表笔接二极管的负极,此时测得的阻值才是二极管的正向导通阻值,这与指针式万用表的表笔接法刚好相反。

### 6. 稳压二极管

稳压二极管在电路中常用“ZD”加数字表示,如ZD5表示编号为5的稳压管。稳压二极管的特点就是击穿后,其两端的电压基本保持不变。这样,当把稳压管接入电路以后,若由于电源电压发生波动,或其他原因造成电路中各点电压变动时,负载两端的电压将基本保持不变。

### 7. 变容二极管

变容二极管通过施加反向电压,使PN结的静电容量发生变化。通常用于自动频率控制、扫描振荡、调频和调谐等用途。

### 8. 发光二极管

发光二极管(LED)是将电能转化为光能的一种器件,由诸如砷化镓(GaAs)、磷化镓(GaP)、磷砷化镓(GaAsP)这样一些半导体材料制成。其电路符号及其外形如图2-21所示。

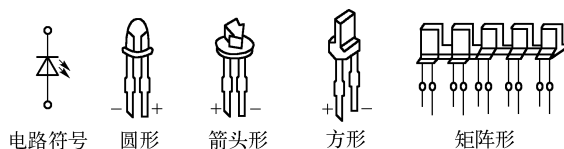


图 2-21 发光二极管的电路符号及其外形

发光二极管也具有单向导电性,工作在正向偏置状态,但它的正向导通电压降比较大,一般在2V左右,当正向电流达到2mA时,发光二极管开始发光,而且光线强度的增加与电流强度成正比。发光二极管发出的光线颜色主要取决于晶体材料及其所掺杂质。常见发光二极管光线的颜色有红色、黄色、绿色和蓝色。

发光二极管的主要参数有发光面积 $A$ 、发光强度 $I_V$ 、最大允许正向直流电流 $I_{Fmax}$ 、最大允许反向电压 $V_{Rmax}$ 、最大允许功耗 $P_{TOT}$ 、允许的环境温度范围 $U_T$ 。

发光二极管主要用作显示器件,用来指示电子设备的工作状态。

### 9. 七段字符显示器

#### (1) 结构和工作原理

七段码显示器如图2-22(a)所示。通常使用的七段字符显示器,是由八个条状发光二极管按图所示的形式排列,每一段就是一个发光二极管,通常表示小数点的段叫做h段,8字的每一段分别叫做a~g段。按规定使某些笔段的发光二极管点亮,就能组成数字或字母。

在实际应用中,小数点段不常使用,所以称七段字符显示器。七段字符显示器内部发光二极

管的连接形式有两种,即共阴极接法(见图 2-22 (b))和共阳极接法(见图 2-22 (c))。七段字符显示器的外形一般是长方形,有 9 个引脚,分别是 com (公共端)和 a~h 端(字段端)。

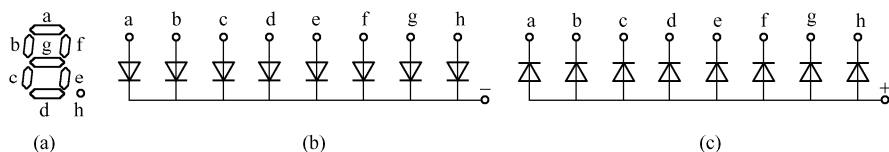


图 2-22 七段字符显示器

七段字符显示器中某一段发光二极管正向导通电流大于 2mA 时,该段被点亮发光,导通电流越大,所发光线越强,人眼感觉越亮,但光电二极管寿命就越短。可以在电路中采用限流电阻控制发光强度。

七段字符显示器能显示 0~9 的数字和简单的字符,如显示大写英文字母 E,需要 a、b、c、d、g 段亮,而 e、f、h 段灭。所以应该正向偏置 a、b、c、d、g 段发光二极管,反向偏置 e、f、h 段发光二极管。对于共阴极连接的七段字符显示器,发光段端的电位要高于公共端 (com),不发光段端的电位应低于或等于公共端;而共阳极连接的七段字符显示器则与此相反。

## (2) 多位七段字符显示器

七段字符显示器在实际应用中,通常是多个字符一起使用,一般按图 2-23 的形式排列。这时,每一个七段字符显示器的 a~h 端相连,统一引出仍然叫 a~h 端。由于它们决定了每一个七段字符显示器的显示字符形式,所以叫字选控制端;每一个七段字符显示器的公共端独立引出并用其控制每个七段字符显示器的亮与灭,叫位选控制端。显示时,利用人眼的视觉暂留现象,采用动态扫描的显示方法,即某一时刻只有一个七段字符显示器被点亮。

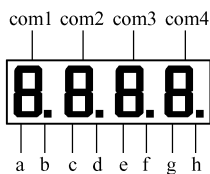


图 2-23 多位七段字符显示器

七段字符显示器的驱动电路比较简单,用数字电路或通用的微处理器芯片都可以实现。

## 10. 瞬态电压抑制二极管 (TVS 管)

瞬态电压抑制二极管常称为防雷管,是一种安全保护器件。这种器件在电路系统中起到分流、钳位作用,可以有效降低由于雷电、电路中开关通/断时产生的高压脉冲,避免雷电、高压脉冲损坏其他器件。

瞬态(瞬变)电压抑制二极管在规定的反向应用条件下,当承受一个高能量的瞬时过压脉冲时,其工作阻抗能立即降至很低的导通值,允许大电流通过,并将电压钳制到预定水平,从而有效地保护电子线路中的精密元器件免受损坏。TVS 能承受的瞬时脉冲功率可达上千瓦,其钳位响应时间仅为 1ps。TVS 允许的正向浪涌电流在 25℃条件下,可达 50~200A。

瞬态电压抑制二极管有单向、双向两种。双向 TVS 可在正、反两个方向吸收瞬时大脉冲功率,并把电压钳制到预定水平,双向 TVS 适用于交流电路,单向 TVS 一般用于直流电路。

## 11. 快恢复二极管

快恢复二极管(简称 FRD)是一种具有开关特性好、反向恢复时间短等特点的半导体二极管,主要应用于开关电源、PWM 脉宽调制器、变频器等电子电路中,作为高频整流二极管、续流二极管或阻尼二极管使用。

快恢复二极管的内部结构与普通 PN 结二极管不同,它属于 PIN 结型二极管,即在 P 型硅材料与 N 型硅材料中间增加了基区 I,构成 PIN 硅片。因基区很薄,反向恢复电荷很小,所以快恢复二极管的反向恢复时间较短,正向压降较低,反向击穿电压(耐压值)较高。

通常, 5A 以下的快恢复二极管则采用 DO-41、DO-15 或 DO-27 等规格塑料封装。5~20A 的快恢复二极管管采用 TO-220FP 塑料封装, 几十安的快恢复二极管一般采用 TO-3P 金属壳封装。更大容量(几百安~几千安)的管子则采用螺栓型或平板型封装形式。

采用 TO-220 或 TO-3P 封装的大功率快恢复二极管, 有单管和双管之分。双管的引脚引出方式又分为共阳极和共阴极。

## 12. 肖特基二极管

肖特基势垒二极管 SBD (Schottky Barrier Diode, 简称肖特基二极管) 是低功耗、大电流、超高速半导体器件。其反向恢复时间极短(可以小到几纳秒), 正向导通压降仅 0.4V 左右, 而整流电流却可达到几千安培。这些优良特性是快恢复二极管所无法比拟的。

肖特基二极管的内部是由阳极金属(用钼或铝等材料制成的阻挡层)、二氧化硅电场消除材料、N-外延层(砷材料)、N 型硅基片、N+阴极层及阴极金属等构成。在 N 型基片和阳极金属之间形成肖特基势垒。当在肖特基势垒两端加上正向偏压(阳极金属接电源正极, N 型基片接电源负极)时, 肖特基势垒层变窄, 其内阻变小; 反之, 若在肖特基势垒两端加上反向偏压时, 肖特基势垒层则变宽, 其内阻变大。

肖特基整流管的结构原理与 PN 结整流管有很大的区别。通常将 PN 结整流管称作结整流管, 而把金属-半导体整流管叫做肖特基整流管, 肖特基整流管仅用一种载流子(电子)输送电荷, 在势垒外侧无过剩少数载流子的积累, 因此, 不存在电荷储存问题, 使开关特性获得明显改善。其反向恢复时间已能缩短到 10ns 以内。但它的反向耐压值较低, 适宜在低压、大电流情况下工作。利用其低压降这一特点, 能提高低压、大电流整流(或续流)电路的效率。

肖特基二极管分为有引线 and 表面安装(贴片式)两种封装形式。采用有引线式封装的肖特基二极管通常作为高频大电流整流二极管、续流二极管或保护二极管使用。它有单管式和对管(双二极管)式两种封装形式。肖特基对管又有共阴(两管的负极相连)、共阳(两管的正极相连)和串联(一只二极管的正极接另一只二极管的负极)三种引脚引出方式。

采用表面安装封装的肖特基二极管有单管型、双管型和三管型等多种封装形式。

## 13. 光电二极管

光电二极管(见图 2-24)又叫做光敏二极管, 管壳上有接收入射光的窗口, 使光线能进入 PN 结。光电二极管可以工作在两种状态: 第一种, 光电二极管加反向工作电压, 没有光线射入时, 它只能流过很小的反向电流。此时, 反向电流的大小与普通二极管相同; 有光线射入时, 在耗尽层中产生自由载流子, 所产生的载流子移出耗尽层, 反向电流增大。反向电流与入射光线的照度之间呈现良好的线性关系。这是光电二极管最常用的工作状态。第二种, 光电二极管不加工作电压, 当有光线射入时, PN 结受光照射产生正向电压, 具有光电池的性质。

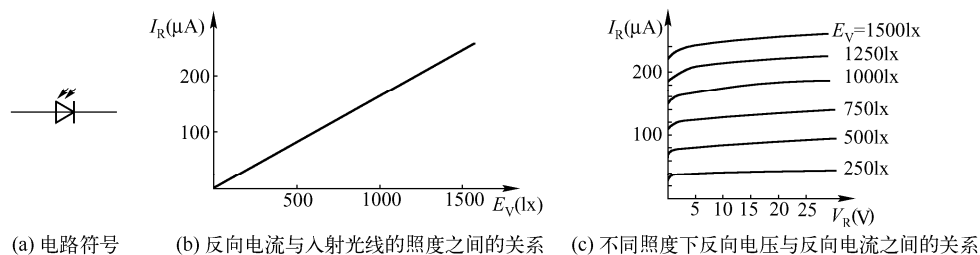


图 2-24 光电二极管

同所有的半导体光电器件一样, 光电二极管也具有一定的光谱灵敏度, 灵敏度从紫外区延伸

到红外区。

光电二极管的主要参数是光电灵敏度（表示照度增加时，反向电流增大了多少）、最大光电灵敏度波长、截止频率、耗尽层电容、最大允许反向电压（一般为 20~30V）和环境温度范围（一般为-50~+100℃）。

14. 晶体三极管

三极管是指对信号有放大作用或开关作用，具有三个电极的半导体器件；其内部都有三层半导体，分别称为发射区、基区和集电区。晶体三极管在电路中常用“Q”加数字表示，如 Q17 表示编号为 17 的三极管。

三极管按工作频率分，有高频三极管和低频三极管；按功率大小分，有大功率、中功率及小功率三极管；按封装形式分，有金属封装和塑料封装；按电极性不同分，有 PNP 型和 NPN 型三极管，这两种类型的三极管从工作特性上可互相弥补，所谓 OTL 电路中的对管就是由 PNP 型和 NPN 型配对使用的。

晶体三极管主要用于放大电路中起放大作用。在常见电路中有三种接法，见表 2-13。

表 2-13 晶体管三种接法电路所具有的特点

名 称	共发射极电路	共集电极电路（射极输出器）	共基极电路
输入阻抗	中（几百欧~几千欧）	大（几十千欧以上）	小（几欧~几十欧）
输出阻抗	中（几千欧~几十千欧）	小（几欧~几十欧）	大（几十千欧~几百千欧）
电压放大倍数	大	小（小于 1 并接近于 1）	大
电流放大倍数	大（几十）	大（几十）	小（小于 1 并接近于 1）
功率放大倍数	大（30~40dB）	小（约 10dB）	中（15~20dB）
频率特性	高频差	好	好
应用	多级放大器中间级	低频放大输入级、输出级或作阻抗匹配用	高频或宽频带电路及恒流源电路

15. 场效应管

场效应管是利用电场效应来控制电流变化的放大元件。它与晶体管相比，具有输入阻抗高、噪声低、热稳定性好等优点，因而被广泛应用于各种电子设备中。尤其用场效应管做整个电子设备的输入级，可以获得一般晶体管很难达到的性能。

场效应管与三极管同为放大器件，但工作原理不同：三极管是电流控制器件，在一定条件下，集电极电流受基极电流控制，而场效应管是电压控制器件，电子电流受栅极电压控制。

场效应管的类型可分两类：一类是结型场效应管；另一类是绝缘栅型场效应管，也称金属-氧化物-半导体绝缘栅型场效应管，简称 MOS 管。结型场效应管根据其沟道所采用的半导体材料，分为 P 型沟道和 N 型沟道两种。沟道，就是电流通道。N 型沟道结型场效应管的基体是一块 N 型硅材料，为 N 沟道。从基体引出两个电极分别称源极（S）和漏极（D）。在基体两边各附一小片 P 型材料，其引出的电极称栅极（G）。这样，在沟道和栅极之间形成了两个 PN 结，当栅极开路时，沟道就相当于一个电阻，不同型号的管子其阻值不相同，一般约数百欧到 1kΩ 不等。

绝缘栅场效应管的特点是输入电阻高，便于做成集成电路。在一块 N 型硅片上有两个相距很近浓度很高的 P 扩散区，分别为源极和漏极，在源区与漏区之间的硅片上，有一层绝缘二氧化硅，绝缘层上覆盖着金属铝，这就是栅极。栅极和其他电极之间是绝缘的，所以称为绝缘栅场效应管。由于源、栅之间有一层氧化层，这种管子基本上没有栅极电流，因此输入阻抗非常高。

## 16. 晶闸管

晶闸管的国际通用名称为 Thyristor。它能在高电压、大电流条件下工作，具有耐压高、容量大、体积小等优点，它是大功率开关型半导体器件，广泛应用于电力、电子线路中。

晶闸管分单向晶闸管和双向晶闸管。单向晶闸管有阳极 A、阴极 K、控制极 G 三个引出脚。双向晶闸管有第一阳极 A1 (T1)，第二阳极 A2 (T2)、控制极 G 三个引出脚。只有当单向晶闸管阳极 A 与阴极 K 之间加有正向电压，同时控制极 G 与阴极间加上所需的正向触发电压时，方可被触发导通。此时 A、K 间呈低阻导通状态，阳极 A 与阴极 K 间压降约为 1V。单向晶闸管导通后，控制极 G 即使失去触发电压，只要阳极 A 和阴极 K 之间仍保持正向电压，单向晶闸管继续处于低阻导通状态。只有把阳极 A 电压拆除或阳极 A、阴极 K 间电压极性发生改变（交流过零）时，单向晶闸管才由低阻导通状态转换为高阻截止状态。单向晶闸管一旦截止，即使阳极 A 和阴极 K 间又重新加上正向电压，仍需在控制极 G 和阴极 K 间又重新加上正向触发电压方可导通。单向晶闸管的导通与截止状态相当于开关的闭合与断开状态，用它可制成无触点开关。

双向晶闸管第一阳极 A1 与第二阳极 A2 间，无论所加电压极性是正向还是反向，只要控制极 G 和第一阳极 A1 间加有正、负极性不同的触发电压，就可触发导通呈低阻状态。此时 A1、A2 间压降也约为 1V。双向晶闸管一旦导通，即使失去触发电压，也能继续保持导通状态。只有当第一阳极 A1、第二阳极 A2 电流减小，小于维持电流或 A1、A2 间当电压极性改变且没有触发电压时，双向晶闸管才截断，此时只有重新加触发电压方可导通。

## 17. 光电耦合器

光电耦合器是利用光束实现电信号的传递。工作时，把电信号加到输入端，使发光器件发光，受光器件在光辐射的作用下产生并输出电流，从而实现以光为媒介的电-光-电两次转换，通过光实现输入端和输出端之间的耦合。光电耦合器由光发送器和一个光接收器组成，如图 2-25 (a) 所示。

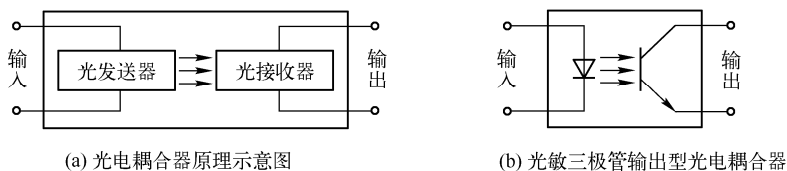


图 2-25 光电耦合器

光电耦合器的种类繁多。常用的是以砷化镓发光二极管为发光部分和以硅光敏器件为受光部分构成的光电耦合器，硅光敏器件与砷化镓发光二极管的光谱匹配十分理想。由于受光器件的不同，而有不同的光电耦合器品种。例如，常见的光电耦合器有光敏二极管输出型、光敏三极管输出型、达林顿光敏三极管输出型、光控晶体闸流管输出型以及集成电路输出型等。光敏三极管输出型光电耦合器在一般电子设备中经常用到，其结构示意图如图 2-25 (b) 所示。

单个光电耦合器通常做成普通晶体管式的外形；多个光电耦合器做在一起的集成式光电耦合器，通常做成常用的双列直插式封装。用在数字电路中的光电耦合器相当于一个光控开关，集成式光电耦合器中输出光敏三极管的基极通常不引出来。

光电耦合器的主要特点是：输入端与输出端之间没有电的直接联系，实现了输入电路与输出电路之间的电气隔离；信号单向传递，输出信号对输入信号无影响；抗干扰能力强。主要应用在输入与输出电路之间的电气隔离以及抗干扰的场合，例如电脑控制系统中，在输入/输出部分与微处理器之间加入光电耦合器来保护微处理器。

18. 变压器

变压器由铁芯（或磁芯）和线圈组成，线圈有两个或两个以上的绕组，其中接电源的绕组叫初级线圈，其余的绕组叫次级线圈。当初级线圈中通有交流电流时，铁芯（或磁芯）中便产生交流磁通，使次级线圈中感应出电压（或电流）。变压器在电路中一般用作电压变换、电流变换、信号传输、阻抗匹配。

（1）变压器的分类

电子设备中常用变压器的分类方法、种类及特点见表 2-14。

表 2-14 电子设备中常用变压器的分类方法、种类及特点

变压器的分类方法	变压器种类		特点、用途
按用途分类	电源变压器		一般变压器，用于低档电子设备
	隔离变压器		初/次级绕组匝数 1：1，多在实验室内使用
	调压器		调整滑动端改变输出电压，多在实验室内使用
	输入/输出变压器	音频变压器	在音频电路里阻抗变换，失真小
		中频变压器	在无线电设备里工作在谐振频率上，金属外壳电磁屏蔽
		高频变压器	在高频电路里阻抗变换，失真小
脉冲变压器		传递脉冲信号失真小	
按导磁材料分类	硅钢片（或坡合金片）变压器		价格低，效率较低
	低频铁氧体磁芯变压器		体积小，效率高，用于信号变换
	高频铁氧体磁芯变压器		工作频率高，体积小，效率高，用于开关电源
按铁芯形状分类	E 形铁芯变压器		结构简单，价格低，效率较低，用于低档电子设备
	C 形铁芯变压器		效率高，成本较高，用于工业电子设备及仪器设备
	R 形铁芯变压器		漏磁小，体积小，损耗低，寿命长，噪声低，重量轻，干扰小，效率高，用于高档电子设备及数字设备
	O 形铁芯变压器		
按防潮方式分类	非密封式变压器		一般变压器，防潮性能较差
	灌封式变压器		用绝缘油灌封绕组，防潮、耐热好，用于大功率输出
	密封式变压器		金属外壳密封，防潮性能较好，并能防止磁场泄漏

图 2-26 是变压器的图形符号及常用变压器的外形。

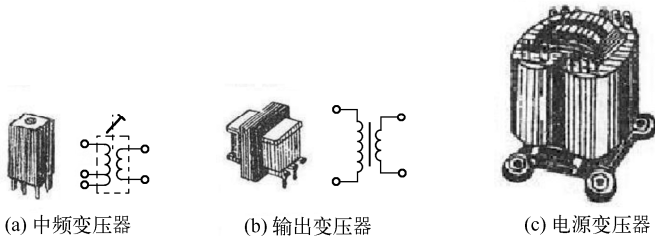


图 2-26 变压器的图形符号及常用变压器的外形

（2）变压器的主要技术参数

- ① 变压比。变压器次级电压与初级电压的比值或次级绕组匝数与初级绕组匝数的比值。通常在变压器外壳上直接标出电压变化的数值，如 220V/12V。变阻比是变压比的另一种表达形式，可以用来表示初级和次级的阻抗变换关系，例如用 4：1 表示初级、次级的阻抗比值。
- ② 额定功率。在规定的电压和频率下，变压器能够长期连续工作而不超过规定温升的输出功率（单位：VA、kVA 或 W、kW）。一般电子设备中的变压器，额定功率都在数百瓦以下。

③ 温升。温升是指线圈的温度。当变压器通电工作以后，线圈温度上升到稳定值时，比环境温度升高的数值。温升高的变压器，绕组导线和绝缘材料容易老化。

④ 效率。它是指输出功率与输入功率的比值，一般用百分数表示。变压器的效率由设计参数、材料、制造工艺及额定功率决定。因为在变压器中总是存在损耗，变压器的效率总是小于 100%。在阻抗匹配的情况下，变压器工作在最佳状态，传输效率最高。通常 20W 以下的变压器的效率大约是 70%~80%，而 100W 以上的变压器的效率可达到 95%左右。

⑤ 空载电流。变压器初级加额定电压而次级空载，这时的初级电流叫做空载电流。空载电流的大小，反映变压器的设计、材料和加工质量；空载电流大的变压器自身损耗大，输出效率低。一般空载电流不超过变压器额定电流的 10%，设计和制作优良的变压器，空载电流可小于额定电流的 5%。

⑥ 绝缘电阻和抗电强度。指线圈之间、线圈与铁芯之间以及引线之间，在规定的时间内（如 1min）可以承受的试验电压。它是判断电源变压器能否安全工作特别重要的参数。不同的工作电压、不同的使用条件和要求，对变压器的绝缘电阻和抗电强度有不同的要求。一般要求电子设备中的小型电源变压器的绝缘电阻不小于 500MΩ，抗电强度不小于 2 000V。

⑦ 空载损耗。指变压器次级开路时，在初级测得的功率损耗。功率损耗主要是铁芯损耗，其次是空载电流在初级线圈铜阻上产生的损耗（铜损），这部分损耗很小。

### （3）变压器的用途

变压器在电路中用于电压变换、电流变换、传递功率、阻抗匹配、或阻抗变换等用途，下面只简单介绍电压变换及阻抗匹配。

① 电压变换。通常把接电源的线圈称作初级线圈或原边线圈，把在互感作用下产生感应电势的线圈称作次级线圈或副边线圈；一个变压器一般只有一个初级线圈，但次级线圈可有一个或多个。若变压器有多个次级线圈，则每个次级线圈与初级线圈的匝数比均可能不同，所以一个变压器可以同时存在升压和降压的可能。

② 阻抗匹配。在电子线路的信号源和负载阻抗不匹配时，需用匹配元件或电路插在两者之间以实现阻抗匹配，变压器的阻抗变换功能便在此发挥作用。

## 19. 继电器

继电器是根据输入电信号变化而接通或断开控制电路、实现自动控制和保护的自动电气装置，它是自动化设备中的主要元件之一，起到操作、调节、安全保护及监测设备工作状态等作用。从广义上说，继电器是一种由电、磁、声、光等输入物理参量控制的开关。

### （1）继电器的分类

继电器的种类繁多，在电子设备中常用的有利用电磁吸力工作的电磁继电器、用极化磁场作用保持工作状态的磁保持继电器、专用于转换高频电路并与同轴电缆匹配的高频继电器、由各种非电量（热、温度、压力等）控制的控制继电器、利用舌簧管工作的舌簧继电器、具有时间控制作用的时间继电器和作为无触点电子开关的固态继电器等。

① 电磁继电器。它是各种继电器中应用最广泛的一种，它以电磁系统为主体构成。图 2-27 是电磁继电器的结构示意图。

当继电器线圈通过电流时，在铁芯、轭铁、衔铁和工作气

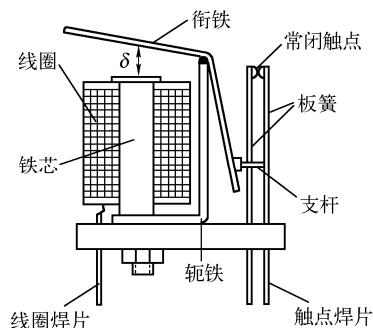


图 2-27 电磁继电器结构示意图

隙 $\delta$ 中形成磁通回路,使衔铁受到电磁吸力的作用被吸向铁芯;此时衔铁带动的支杆将板簧推开,断开“常闭触点”(或接通“常开触点”)。当切断继电器线圈的电流时,电磁力失去,衔铁在板簧的作用下恢复原位,触点又闭合。

电磁继电器的特点是触点接触电阻很小,结构简单,工作可靠。缺点是动作时间较长,触点寿命较短,体积较大。

② 舌簧继电器。它是一种结构简单的小型继电器,具有动作速度快、工作稳定、机电寿命长以及体积小等优点。常见的有干簧继电器和湿簧继电器两类。

a. 干簧继电器。由一个或多个干式舌簧开关(又称干簧管)和励磁线圈(或永久磁铁)组成,

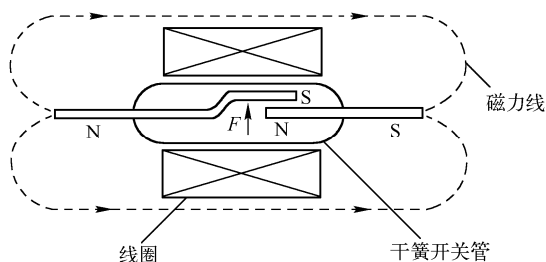


图 2-28 干簧继电器结构示意图

结构示意图如图 2-28 所示。干簧管内有一组导磁簧片,封装在充有惰性气体的玻璃管内,导磁簧片又兼做接触簧片,起着电路开关和导磁的双重作用。当线圈通过电流或将磁铁接近干簧管时,两个簧片的端部形成极性相反的磁极而相互吸引。当吸引力 $F$ 大于簧片的弹力时,两者接触,使常开触点闭合;当线圈中的电流减小或磁铁远离时,簧片间的吸引力 $F$ 小于簧片的弹力,动簧片又返回到初始位置,触点断开。

干簧管的优、缺点如下:

a) 触点与大气隔绝,管内又充有惰性气体,这就大大减少了触点在开、闭过程中由于触点火花而引起的触点氧化和碳化,而且也可防止外界有机蒸汽和灰尘等杂质对触点的侵蚀。

b) 簧片细而短,有较高的固有频率,因此,触点的通断速度较高,其开关速度要比一般的电磁继电器快 5~10 倍。

c) 体积小,重量轻。

d) 其缺点是开关容量小,触点易产生抖动以及触点接触电阻大。

b. 湿簧继电器。它是在干簧继电器的基础上发展起来的。湿簧管是在干簧管内充入了水银和高压氢气,使触点被水银浸润而成为汞润触点,氢气不断地净化触点上的水银,使触点一直被纯净的汞膜保护着。用湿簧管制成的舌簧继电器称为湿簧继电器。根据动作原理,湿簧继电器可分为非极化和极化两种。根据触点形式,又分为常开触点及转换触点两种,转换触点又有两位置偏移式及三位置极化式之分。

如图 2-29 所示,图(a)为非极化转换触点湿簧继电器的动作原理图;图(b)为极化式湿簧继电器的结构简图,它和非极化式的区别,是在对称的两个电极上分别焊有两个永久磁铁,能够把上磁极和动簧片端头先行磁化。

③ 固态继电器。由固体电子元器件组成的无触点开关,称为固态继电器,简称 SSR (Solid State Relay)。利用它控制灵活、工作长寿可靠、防爆耐震和无声运行等特点来通、断电气设备中的电源。按使用场合,固态继电器(SSR)可以分为交流型和直流型两大类。它们的外形如图 2-30 所示。

交流型 SSR 原理图如图 2-31 (a) 所示。它有两个输入端、两个输出端。工作时,只要在输入端加上一定的控制信号,便可控制输出端的“通”与“断”。由于使用了光耦合器电路,故既有控制信号在输入、输出端之间的耦合功能,又能在电气上断开输入与输出间的直接连接,起到良好的绝缘隔离作用。同时,由于输入端的负载是发光二极管,使 SSR 的输入端很容易做到与输入信号电平相匹配,在使用中可直接与计算机输出端口连接,接受数字逻辑电平控制。



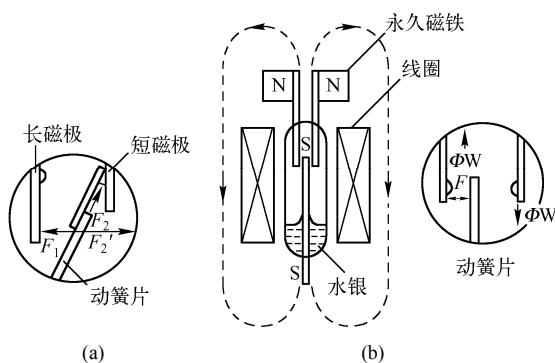


图 2-29 两种湿簧继电器结构原理图

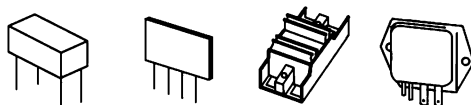


图 2-30 固态继电器的外形

直流型 SSR 的工作原理与交流型相同，但二者的输出电路稍有不同，如图 2-31 (b) 所示是直流型 SSR 的内部电路原理图。

SSR 的参数包括输入参数和输出参数，表 2-15 列出了国产 SSR 的参数范围，供选用时参考。

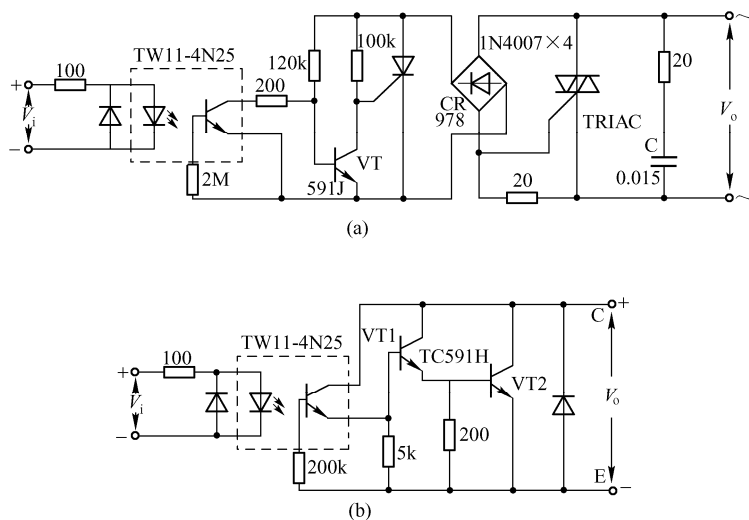


图 2-31 固态继电器的内部电路原理图

表 2-15 SSR 的主要参数

	参数名称	典型数值	
		交流型	直流型
输入	输入电压 (V)	3~30	
	输入电流 (mA)	3~30	
	临界导通电压 (V)	≤3	
	临界导通电流 (mA)	≥1	
	释放电压 (V)	≥1	

续表

	参 数 名 称	典 型 数 值	
		交 流 型	直 流 型
输出	额定工作电压 (V)	30~380	4~50
	额定工作电流 (A)	1~25	1~3
	过零电压 ( V )	5~25	1
	浪涌电流/工作电流 (倍)	10	
	通态压降 (V)	≤1.5~1.8	≤1.5
	通态电阻 (Ω)		≤20
	断态漏电流 (mA)	≤5~8	<0.01
输出	断态电阻 (MΩ)	≤2	≤2
	接通与关断时间	<10ms	<100μs
	工作频率 (Hz)	45~65	
	输入/输出端绝缘电阻 (MΩ)	≥10 <sup>3</sup>	
	输入/输出端绝缘电压 (kV)	≥1~2	

(2) 主要技术参数

① 额定工作电压。指继电器正常工作时线圈所需要的电压。根据继电器的型号不同，可以是交流电压，也可以是直流电压。

② 吸合电流。指继电器能够产生吸合动作的最小电流。在正常使用时，给定的电流必须略大于吸合电流，这样继电器才能稳定地工作。而对于线圈所加的工作电压，一般不要超过额定工作电压的 1.5 倍，否则会产生较大的电流而把线圈烧毁。

③ 释放电流。指继电器产生释放动作的最大电流。当继电器吸合状态的电流减小到一定程度时，继电器就会恢复到未通电的释放状态。这时的电流远远小于吸合电流。

④ 触点负荷。继电器触点允许的电压、电流值，它决定了继电器的控制能力。一般继电器的触点负荷见表 2-16。

表 2-16 一般继电器的触点负荷

功 率 级 别	微 功 率	小 功 率	中 功 率	大 功 率
触点负荷	<0.2A (接通电压<28V)	0.5~1A	2~5A	10~20A

(3) 继电器的型号命名

继电器型号的命名方法不一，部分常用继电器的型号命名见表 2-17。

表 2-17 部分常用继电器的型号命名法

第 一 部 分		第 二 部 分				第 三 部 分		第 四 部 分	第 五 部 分	
主 称		设 备 分 类				形 状 特 征		序 号	防 护 特 性	
符号	含义	符号	含义	符号	含义	符号	含义		符号	含义
J	继电器	R	小功率	S	时间	X	小型	数字	F	封闭式
		Z	中功率	A	舌簧	C	超小型		M	密封式
		Q	大功率	M	脉冲	Y	微型			
		C	电磁	J	特种					
		V	温度							

继电器线圈在电路中用一个长方框符号表示,如果继电器有两个线圈,就画两个并列的长方框。同时在长方框内或长方框旁标上继电器的文字符号“J”。继电器的触点有两种表示方法:一种是把它们直接画在长方框一侧,这种表示法较为直观;另一种是按照电路连接的需要,把各个触点分别画到各自的控制电路中,通常在同一继电器的触点与线圈旁分别标注上相同的文字符号,并将触点组编上号码,以示区别。

继电器的触点有三种基本形式:

① 动合型(H型)。线圈不通电时两触点是断开的,通电后,两个触点就闭合。以合字的拼音字头“H”表示。

② 动断型(D型)。线圈不通电时两触点是闭合的,通电后两个触点就断开。用断字的拼音字头“D”表示。

③ 转换型(Z型)。触点组共有三个触点,即中间是动触点,上下各一个静触点。线圈不通电时,动触点和其中一个静触点断开,而另一个闭合;线圈通电后,动触点就移动,使原来断开的变为闭合,原来闭合的变为断状态,达到转换的目的。这样的触点组称为转换触点。用“转”字的拼音首字母“Z”表示。

## 20. 保险元件

常用的保险元件有普通玻璃管熔丝、延迟型熔丝、熔断电阻和温度熔丝等。

(1) 普通玻璃管熔丝。十分常用,其价格低廉,使用方便,额定电流从0.1A到数十安不等,尺寸规格主要有18mm、20mm、22mm。

(2) 延迟型熔丝。特点:能承受短时间大电流(浪涌电流)的冲击,而在电流过载超过一定时限后又能可靠地熔断。这种熔丝主要用在开机瞬时电流较大的电子整机中,如彩电中就广泛使用了延迟型熔丝,其规格主要有2A、3A、4A等。延迟型熔丝常在电流规格前加字母T,如T2A,这样可区别于普通熔丝。

(3) 熔断电阻。又称保险电阻,是一种具有电阻和熔丝双重功能的元件,不过其电阻值通常较小,仅数欧至零点几欧,少数为几十欧或千欧,保险电阻大都起限流作用,因此主要功能还是起保险作用。保险电阻大都是灰色,用色环或数字表示阻值,额定功率由电阻尺寸大小决定,也有直接标在电阻体上的。

(4) 可恢复熔丝。由高分子材料及导电材料混合做成的过流保护元件,在常温下,其阻抗很小,但在动作后会形成高阻状态,当故障排除后又自动返回低阻状态。依据能承受的最大电压,可恢复熔丝可分为多个系列;每个系列中,根据的不同工作电流,又分为若干型号。

## 21. 晶体振荡器

晶体振荡器是一种用于稳定频率和选择频率的电子元件,我们常说的晶体振荡器(也称晶振),是从石英晶体上按一定的方位角切下薄片,然后在晶片的两个对应表面上涂上银层,并装上一对金属引脚后用外壳密封。

石英晶片能做振荡器是基于它的“压电效应”,即只要在晶片的两个极板间加一电场,晶片就会产生机械变形;若在极板间施加机械压力,又会在相应的方向上产生电场,这种现象称为压电效应。如果在极板间所加的是交变电压,就会产生机械变形振动,同时机械变形又会产生交变电场,但这种机械振动的振幅很小,但其振动频率是很稳定的。

晶体振荡器按封装外形分有金属壳、玻璃壳、胶木壳和塑封等几种,按频率稳定度分有普通型和高精密型两种。晶体振荡器的主要电参数是标称频率、负载电容、激励电平、工作温度范围和温度频差。

晶振元件组成振荡电路时需配接外部电容,此电容即负载电容,是参与决定振荡频率的,负载电容可从设备的技术参数查得。在规定的负载电容下晶振元件的振荡频率即为标称频率,标称频率都标注在外壳上,故很容易识别。激励电平是指晶振工作时消耗有效功率;温度频差是指在工作温度范围内的工作频率相对于基准温度下的最大偏离值,该参数代表了晶振的频率温度特性。

## 22. 霍尔器件

霍尔器件是在霍尔效应原理的基础上利用集成电路技术制成的。当一块通有电流的金属或半导体薄片垂直地置于磁场中时,薄片两侧由此会产生电位差,此现象即称为霍尔效应。薄片两侧产生的电位差称为霍尔电动势。霍尔电动势与外加磁场的磁感应强度  $B$ 、薄片通过的电流  $I$  成正比,与薄片的厚度  $d$  成反比。

霍尔器件按输出端功能可分为开关型、线性型霍尔器件;按有源类型可分为双极型和 MOS 型。

## 23. 集成电路

集成电路是利用半导体工艺或厚膜、薄膜工艺,将电阻、电容、二极管、双极型三极管、场效应晶体管等元器件按照设计要求连接起来,制作在同一硅片上,成为具有特定功能的电路。这种器件打破了电路的传统概念,实现了材料、元器件、电路的三位一体,与分立元器件组成的电路相比,具有体积小、功耗低、性能好、重量轻、可靠性高、成本低等许多优点。

### (1) 集成电路的基本类别

对集成电路分类,是一个很复杂的问题,分类方法有很多种:按制造工艺分类、按基本单元核心器件分类、按集成度分类、按电气功能分类、按应用环境条件分类、按通用或专用的程度分类等。

① 按照制造工艺分类。用平面工艺(氧化、光刻、扩散、外延工艺)在半导体晶片上制成的电路称为半导体集成电路(也称单片集成电路),一般所说的集成电路就是指半导体集成电路。

用厚膜工艺(真空蒸发、溅射)或薄膜工艺(丝网印刷、烧结)将电阻、电容等无源元件连接制作在同一片绝缘衬底上,再焊接上晶体管管芯,使其具有特定的功能,叫做厚膜或薄膜集成电路。

如果厚膜集成电路再连接上单片集成电路,则称为混合集成电路。

② 按照基本单元核心器件分类。可以分为双极型集成电路、MOS 型集成电路、双极-MOS 型(BIMOS)集成电路。用双极型三极管或 MOS 场效应晶体管作为基本单元的核心器件,可以分别制成双极型集成电路或 MOS 型集成电路。由 MOS 器件作为输入级、双极型器件作为输出级电路的双极-MOS 型(BIMOS)集成电路,具有更强的驱动能力而且功耗较小。

③ 按照集成度分类。有小规模(集成了几个门电路或几十个元件)、中规模(集成了 100 个门或几百个元件以上)、大规模(1 万个门或 10 万个元件)、超大规模(10 万个元件以上)集成电路。

④ 按照电气功能分类。一般可以把集成电路分成数字和模拟集成电路两大类,见表 2-18。

表 2-18 半导体集成电路的分类

数字 集成 电路	逻辑电路	门电路、触发器、计数器、加法器、延时器、锁存器、算术逻辑单元、编码器、译码器、脉冲发生器、多谐振荡器、可编程逻辑器件(PAL、GAL、FPGA、ISP)、特殊数字电路
	微处理器	通用微处理器、单片机电路、数字信号处理器(DSP)、通用/专用支持电路、特殊微处理器
	存储器	动态/静态 RAM、ROM、PROM、EPROM、E <sup>2</sup> PROM、特殊存储器件
模拟 集成 电路	接口电路	缓冲器、驱动器、A/D、D/A、电平转换器、模拟开关、模拟多路器、数字多路/选择器、采样/保持电路、特殊接口电路
	光电器件	光电传输器件、光发送/接收器件、光电耦合器、光电开关、特殊光电器件
	音频/视频电路	音频放大器、音频/射频信号处理器、视频电路、电视机电路 音频/视频数字处理电路、特殊音频/视频电路
	线性电路	线性放大器、模拟信号处理器、运算放大器、电压比较器、乘法器、电压调整器、基准电压电路、特殊线性电路

a. 数字集成电路。数字电路是能够传输“0”和“1”两种状态信息并完成逻辑运算的电路。与模拟电路相比,数字电路的工作形式简单、种类较少、通用性强、对元器件的精度要求不高。数字电路中最基本的逻辑关系有“与”、“或”、“非”三种,再由它们组合成各类门电路和某一特定功能的逻辑电路,如触发器、计数器、寄存器、译码器等。按照逻辑电平的定义,数字电路分为正逻辑和负逻辑两种。正逻辑是用“1”状态表示高电平,“0”状态表示低电平,而负逻辑则与其相反。

MOS 型数字集成电路包括 CMOS、PMOS、NMOS 三大类,具有构造简单、集成度高、功耗低、抗干扰能力强、工作温度范围大等特点。因此,MOS 型数字集成电路已广泛应用于计算机电路。近年来,PMOS、NMOS 器件已经趋于淘汰。常用的 CMOS 型数字集成电路有 4000、74HC $\times\times$ 系列。

大规模数字集成电路(LST)也分为双极型和 MOS 型两大类。由于 MOS 型电路具有集成度易于提高、制造工艺简单、成品率高、功耗低等许多优点,所以 LST 电路多为 MOS 电路,计算机电路中的 CPU、ROM(只读存储器)、RAM(随机存储器)、EPROM(可编程只读存储器)以及多种电路均属于此类。

b. 模拟集成电路。模拟集成电路的精度高、种类多、通用性小。按照电路输入信号和输出信号的关系,模拟集成电路还分类为线性集成电路和非线性集成电路。

线性集成电路指输出、输入信号呈线性关系的集成电路。它以直流放大器为核心,可以对模拟信号进行加、减、乘、除以及微分、积分等各种数学运算,所以又称为运算放大器。线性集成电路广泛应用在消费类、自动控制及医疗电子仪器等设备上。这类电路的型号很多,功能多样。根据功能可分一般型(低增益、中增益、高增益、高精度)和特殊型(高输入阻抗、低漂移、低功耗、高速度)。

非线性集成电路大多是特殊集成电路,其输入、输出信号通常是模拟-数字、交流-直流、高频-低频、正-负极性信号的混合,很难用某种模式统一起来。例如,用于通信设备的混频器、振荡器、检波器、鉴频器、鉴相器,用于工业检测控制的模-数隔离放大器、交-直流变换器,稳压电路及各种消费类家用电器中的专用集成电路,都是非线性集成电路。

⑤ 按照通用或专用的程度分类。分成通用型、半专用、专用等几个类型。

半专用集成电路也称半定制集成电路(SCIC),是指那些由器件制造厂商提供母片,再经整机厂用户根据需要确定电气性能和电路逻辑的集成电路。常见的半通用集成电路有门阵列(GA)、标准单元器件(CBIC)、可编程逻辑器件(PLD)、模拟阵列和数字-模拟混合阵列。

专用集成电路也称定制集成电路(ASIC),是整机厂用户根据本企业设备的设计要求,从器件制造厂专门定制、专用于本企业设备的集成电路。

显然,从有利于采用法律手段保护知识产权、实现技术保密的角度看,ASIC 集成电路最好,SCIC 比通用集成电路好;从技术上说,ASIC、SCIC 芯片的功能更强、性能更稳定,大批量生产的成本更低。

⑥ 按应用环境条件分类。集成电路的质量等级分为军用级、工业级和商业(民用)级。在军事工业、航天、航空等领域,环境条件恶劣、装配密度高,军用级集成电路应该有极高的可靠性和温度稳定性,对价格的要求退居其次;商业级集成电路工作在一般环境条件下,保证一定的可靠性和技术指标,追求更低廉的价格;工业级集成电路是介于二者之间的设备,但不是所有集成电路都有这三个等级的品种。一般来说,对于相同功能的集成电路,工业级芯片的单价是商业级芯片的 2 倍以上,而军用级芯片的单价则可能达到 4~10 倍。

(2) 集成电路的型号与命名

国外各大公司生产的集成电路在推出时已经自成系列，但除了表示公司标志的电路型号字头有所不同以外，一般说来在数字序号上基本是一致的。大部分数字序号相同的器件，功能差别不大而可以代换。因此，在使用国外集成电路时，应该查阅手册或几家公司的设备型号对照表，以便正确选用器件。

在国内，半导体集成电路研制生产的起步并不算晚，但由于设备条件落后和工艺水平低下，除了设备类型不如国外多样，更主要的问题在于质量不够稳定，特别是大多数品种的生产合格率很低，使平均成本过高，无法参加市场商品竞争。近年来，国内半导体器件的生产厂家通过技术设备引进，在发展微电子设备技术方面取得了一些进步。国家标准规定，国产半导体集成电路的型号命名由五部分组成，见表 2-19。

表 2-19 国产半导体集成电路的命名符号及意义

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分	第五部分
字母表示器件符合国家标准		字母表示器件的类型		数字表示器件的系列和品种代号		字母表示器件的工作温度范围（℃）	字母表示器件的封装形式
符号	含义	符号	含义	符号	含义	符号	含义
C	中国制造	T	TTL 电路	C	0~+70	W	陶瓷扁平封装
		H	HTL 电路	E	-40~+85	B	塑料扁平封装
		E	ECL 电路	R	-55~+85	F	全密封扁平封装
		C	CMOS 电路	M	-55~+125	D	陶瓷直插封装
		F	线性放大器			P	塑料直插封装
		D	音响电路			J	玻璃直插封装
		W	稳压器			H	玻璃扁平封装
		J	接口电路			K	金属壳菱形封装
		B	非线性电路			T	金属壳圆形封装
		M	存储器				
		μ	微处理器				
		AD	模-数转换器				
		DA	数-模转换器				
		S	特殊电路				

进口集成电路的型号命名一般是用前几位字母符号表示制造厂商，用数字表示器件的系列和品种代号。常见外国公司生产的集成电路的字头符号见表 2-20。

表 2-20 常见外国公司生产的集成电路的字头符号

字 头 符 号	生产国及厂商名称	字 头 符 号	生产国及厂商名称
AN, DN	日本松下	UA, F, SH	美国仙童
LA, LB, STK, LD	日本三洋	IM, ICM, ICL	美国英特尔
HA, HD, HM, HN	日本日立	UCN, UDN, UGN, ULN	美国斯普拉格
TA, TC, TD, TL, TM	日本东芝	SAK, SAJ, SAT	美国 ITT
MPA, Mpb, μPC, μPD	日本日电	TAA, TBA, TCA, TDA	欧洲电子联盟
CX, CXA, CXB, CXD	日本索尼	SAB, SAS	德国 SIGE
MC, MCM	美国摩托罗拉	ML, MH	加拿大米特尔

(3) 集成电路的封装

集成电路的封装,按材料基本分为金属、陶瓷、塑料三类,按电极引脚的形式分为通孔插装式及表面安装式两类。这几种封装形式各有特点,应用领域也有区别。

① 金属封装。散热性好,电磁屏蔽好,可靠性高,但安装不够方便,成本较高,常见于高精度集成电路或大功率器件。符合国家标准金属封装有T型和K型两种,外形如图2-32所示。

② 陶瓷封装。导热好且耐高温,但成本比塑料封装高,所以高档芯片一般都采用陶瓷封装。参见图2-33,国家标准规定的陶瓷封装集成电路可分为扁平型(W型,见图(a))和双列直插型(D型,国外一般称为DIP型,见图(b))两种。但W型封装的陶瓷扁平集成电路的水平引脚较长,现在被引脚较短的SMT封装所取代,已经很少见到。直插型陶瓷封装的集成电路,随着引脚数的增加,发展为CPGA(Ceramic Pin Grid Array)形式,图(c)是微处理器(CPU)的陶瓷PGA型封装。

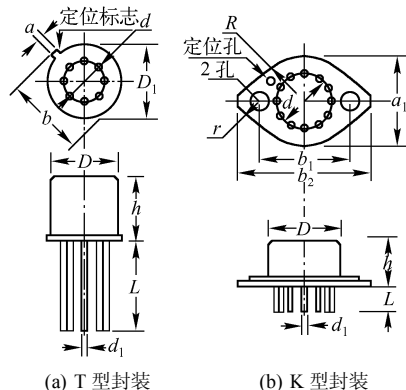


图 2-32 金属封装集成电路

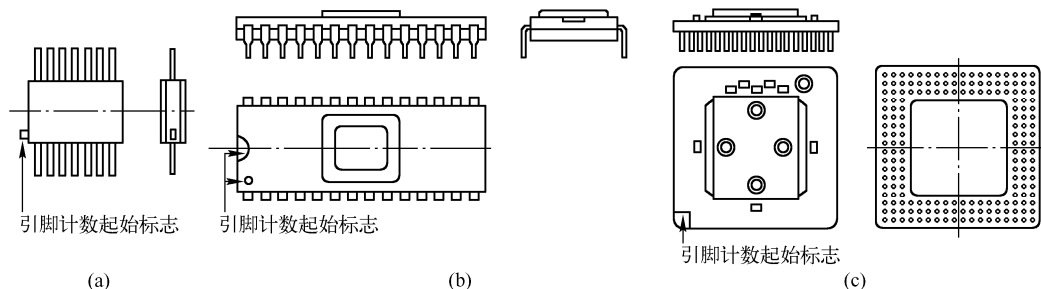


图 2-33 陶瓷封装集成电路

③ 塑料封装。这是最常见的封装形式,其最大特点是工艺简单、成本低,因而被广泛使用。国家标准规定的塑料封装的形式,可分为扁平型(B型)和直插型(D型)两种。

随着集成电路品种规格的增加和集成度的提高,电路的封装已经成为一个专业性很强的工艺技术领域。现在,国内外的集成电路封装名称逐渐趋于一致,不论是陶瓷材料的还是塑料材料的,均按集成电路的引脚布置形式来区分。图2-34是常见的几种集成电路封装,其中,图(a)、(b)、(c)三种封装多用于音频前置放大、功率放大集成电路。

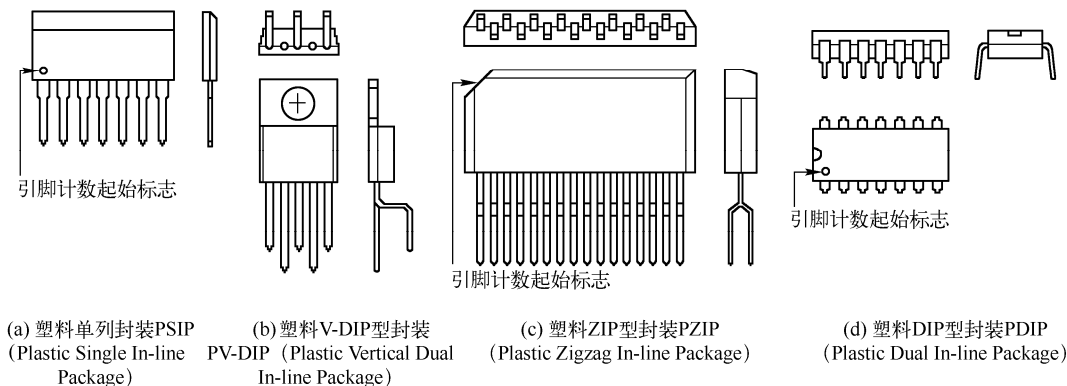


图 2-34 常见的塑料封装集成电路

中功率器件为降低成本、方便使用，现在也大量采用塑料封装形式。但为了限制温升并有利于散热，通常都封装一块导热金属板，便于加装散热片，如图 2-34 (b) 所示。

④ 集成电路的引脚分布和计数。集成电路是多引脚器件，在电路原理图上，引脚的位置可以根据信号的流向摆放，但在电路板上安装芯片，就必须严格按照引脚的分布位置和计数方向插装。绝大多数集成电路相邻两个引脚的间距是 2.54mm (英制 100mil)，宽间距的是 5.08mm (200mil)，窄间距的是 1.778mm (70mil)；DIP 封装芯片两列引脚之间的距离是 7.62mm (300mil) 或 15.24mm (600mil)。

集成电路的表面一般都有引脚计数起始标志，在 DIP 封装集成电路上，有一个圆形凹坑或弧形凹口：当起始标志位于芯片的左边时，芯片左下方、离这个标志最近的引脚被定义为集成电路的第 1 脚，按逆时针方向计数，顺序定义为第 2 脚、第 3 脚、……有些芯片的封装被斜着切去一个角或印上一个色条作为引脚计数起始标志，离它最近的引脚也是第 1 脚，其余引脚按逆时针方向计数。图 2-32、图 2-33 和图 2-34 中的集成电路都画出了引脚计数起始标志。

#### 24. 三端稳压集成电路

三端固定就是该集成稳压器件的引出脚只有三条：输入端、输出端、接地端，其输出电压是固定不能调节的。该器件内部设置了过流、芯片过热及调整器件安全工作区的保护电路，因此在使用时需要的外围元件很少，使用非常方便。

三端固定集成稳压器件按输出电压类型分有正电压系列 (78 系列) 和负电压系列 (79 系列) 两大系列，每个系列又有 5V、6V、8V、9V、10V、12V、15V、18V、24V 等多种类型的输出电压。

78/79 系列集成稳压 IC 型号中的 78 或 79 后面的数字代表该三端集成稳压电路的输出电压，如 7806 表示输出电压为正 6V，7909 表示输出电压为负 9V。78/79 系列三端稳压 IC 有很多电子厂家生产，通常前缀为生产厂家的代号，如 TA7805 是东芝的设备，AN7909 是松下的设备。

有时在数字 78 或 79 后面还有一个 M 或 L，如 78M12 或 79L24，用来区别输出电流和封装形式等，其中 78L 系列的最大输出电流为 100mA，78M 系列最大输出电流为 1A，78 系列最大输出电流为 1.5A。它的封装也有多种。塑料封装的稳压电路具有安装容易、价格低廉等优点，因此用得比较多。79 系列除了输出电压为负、引出脚排列不同以外，命名方法、外形等均与 78 系列的相同。

三端固定集成稳压电路使用方便，在电子制作中经常采用。例如，可以用来改装分立元件的稳压电源，并用作电子设备的工作电源。使用时，注意三端集成稳压电路的输入、输出和接地端绝不能接错，否则容易烧坏。另外，三端集成稳压电路的最小输入、输出电压差约为 2V，否则不能输出稳定的电压，一般应使电压差保持在 4~5V，即经变压器变压、二极管整流、电容器滤波后的电压应比稳压值高一些。

当稳压管温度过高时，稳压性能将变差，甚至损坏。在实际应用中，应在三端集成稳压电路上安装足够大的散热器 (当然小功率的条件下不用)。

当制作中需要一个能输出 1.5A 以上电流的稳压电源，通常采用几块三端稳压电路并联起来，使其最大输出电流为  $N$  个 1.5A，但应用时需注意：并联使用的集成稳压电路应采用同一厂家、同一批号的设备，以保证参数的一致。另外，在输出电流上留有一定的余量，以避免个别集成稳压电路失效时导致其他电路的连锁烧毁。

在 78、79 系列三端稳压器中最常应用的是 TO-220 和 TO-202 两种封装。这两种封装的图形以及引脚序号、引脚功能如图 2-35 所示。图中的引脚号标注方法是按照引脚电位从高到低的顺序标注的。这样标注便于记忆。引脚 1 为最高电位，3 脚为最低电位，2 脚居中。从图中可以看出，



不论正压还是负压, 2 脚均为输出端。此外, 还应注意, 散热片总是和最低电位的第 3 脚相连。这样在 78 系列中, 散热片和地相连接, 而在 79 系列中, 散热片却和输入端相连接。

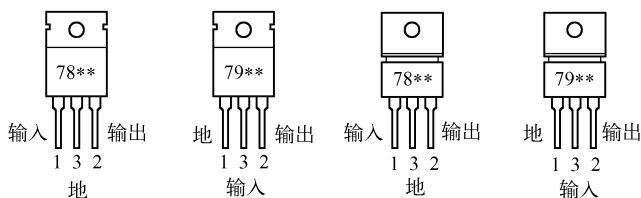


图 2-35 两种封装的图形以及引脚序号、引脚功能

三端固定集成稳压器 7805 的参数见表 2-21。

表 2-21 三端固定集成稳压器 7805 的参数

参 数	测试条件 ( $T_j=25^{\circ}\text{C}$ )	标 准 值			单 位
		最 小	典 型	最 大	
输出电压 $V_O$	$5.0\text{mA} \leq I_O \leq 1.0\text{A}$ $7.0\text{V} \leq V_I \leq 20\text{V}$	4.8	5.0	5.2	V
电压调整率 $S_V$	$7.0\text{V} \leq V_I \leq 25\text{V}$		3	50	mV
电流调整率 $S_I$	$5.0\text{mA} \leq I_O \leq 1.5\text{A}$		15	100	mV
备用电流 $I_q$			4.2	6.0	mA
输出噪声电压 $V_{NO}$	10~100Hz		40	200	$\mu\text{V}$
纹波抑制比 $S_{rip}$	$F=100\text{Hz}$ , $8\text{V} \leq V_I \leq 18\text{V}$	68	78		dB
最小输入-输出压差 $ V_I - V_O $	$I_O=1.0\text{A}$		2.0	2.5	V
短路输出限制电流 $I_{SC}$			0.75	1.2	A
输出峰值电流 $I_{OP}$		1.3	2.2	3.3	A
输出电压温度系数 $S_T$			$\pm 0.6$		mV/ $^{\circ}\text{C}$

## 25. 电声元件

电声元件用于电信号和声音信号之间的相互转换, 常用的有扬声器、耳机、传声器(送话器、受话器)等。

### (1) 扬声器

扬声器俗称喇叭, 是音响设备中的主要元件。扬声器的种类很多, 除了已经淘汰的舌簧式以外, 现在多见的是电动式、励磁式和晶体压电式, 图 2-36 是常见扬声器的结构与外形。

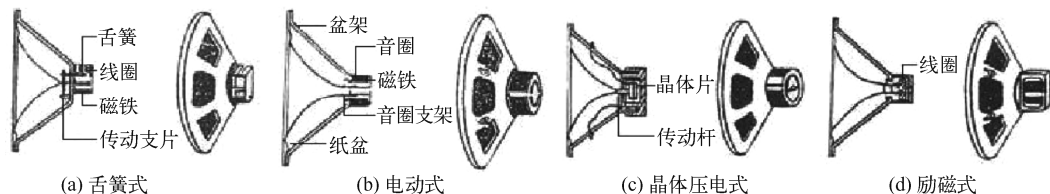


图 2-36 常见扬声器的结构与外形示意图

① 电动式扬声器。按所采用的磁性材料不同, 电动式扬声器分为永磁式和恒磁式两种。永磁式扬声器的磁体很小, 可以安装在内部, 所以又称内磁式。它的特点是漏磁少、体积小但价格稍高。彩色电视机和电脑多媒体音箱等对磁屏蔽有要求的电子设备一般采用的全防磁喇叭就是永

磁式电动扬声器。恒磁式扬声器的磁体较大，要安装在外部，所以又称外磁式。其特点是漏磁大、体积大但价格便宜，通常用在普通收音机等低档电子设备中。

电动式扬声器的结构见图 2-37，由纸盆、音圈、磁体等组成。当音圈内通过音频电流时，音圈产生变化的磁场，与固定磁体的磁场相互作用，使音圈随电流变化而前后运动，带动纸盆振动发出声音。

② 压电陶瓷扬声器和蜂鸣器。压电陶瓷随两端所加交变电压产生机械振动的性质叫做压电效应，为压电陶瓷片配上纸盆就能制成压电陶瓷扬声器。这种扬声器的特点是体积小、厚度薄、重量轻，但频率特性差、输出功率小，目前还在改进研制之中。压电陶瓷蜂鸣器则广泛用于电子设备输出音频提示、报警信号。

### (2) 耳机和耳塞机

耳机和耳塞机在电子设备的放音系统中代替扬声器播放声音。它们的结构和形状各有不同，但工作原理和电动式扬声器相似，也是由磁场将音频电流转变为机械振动而还原声音。耳塞机的体积微小，携带方便，一般应用在袖珍收、放音机中。耳机的音膜面积较大，能够还原的音域较宽，音质、音色更好一些，一般价格也比耳塞机更贵。

### (3) 传声器

传声器俗称话筒，它的作用与扬声器相反，是将声能转换为电能的元件。常见的话筒种类有动圈式、晶体式、铝带式、电容式等，以动圈式和驻极体电容式应用最广泛。

① 动圈式传声器。它由永久磁铁、音圈、音膜和输出变压器等组成，其结构如图 2-38 所示。声压使传声器的音膜振动，带动音圈在磁场里前后运动，切割磁力线产生感应电动势，把感受到的声音转换为电信号。输出变压器进行阻抗变换并实现输出匹配。这种话筒有低阻（ $200\sim 600\Omega$ ）和高阻（ $10\sim 20k\Omega$ ）两类，以阻抗  $600\Omega$  的最常用，频率响应一般在  $200\sim 5\,000\text{Hz}$ 。动圈式传声器的结构坚固，性能稳定，经济耐用。

② 普通电容式传声器。它由一个固定电极和一个膜片组成，其结构与接线如图 2-39 所示。声压使膜片振动引起电容量改变，电路中充电电流随之变化，此电流在电阻上转换成电压输出。普通电容式话筒带有电源和放大器，给电容振膜提供极化电压并将微弱的电信号放大。这种话筒的频率响应好，输出阻抗极高，但结构复杂，体积大，又需要供电系统，使用不够方便，适合在对音质要求高的固定录音室内使用。

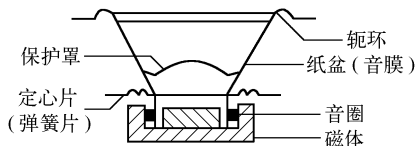


图 2-37 电动式扬声器的结构示意图

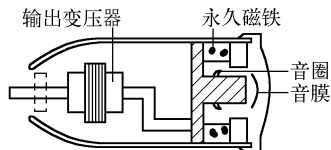


图 2-38 动圈式传声器的结构示意图

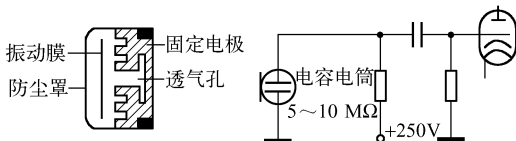


图 2-39 普通电容式传声器的结构与接线

③ 驻极体电容式传声器。除了具有普通电容式传声器的优良性能以外，还因为驻极体振动

膜不需要外加直流极化电压就能够永久保持表面电荷,所以结构简单、体积小、重量轻、耐振动、价格低廉、使用方便,获得了广泛的应用。但驻极体电容式传声器在高温高湿的工作条件下寿命较短。

这种传声器的内部结构如图 2-40 所示,驻极体电容的输出阻抗很高,可达几十兆欧,所以传声器内一般用场效应管进行阻抗变换以便与音频放大电路相匹配。



图 2-40 驻极体电容式传声器的内部结构

## 26. 显像管

### (1) 显像管的结构原理

显像管由玻璃外壳、电子枪、荧光屏和管外偏转线圈四大部分组成,就显像管本身的结构及其工作特性来说,它也属于真空电子管。显像管电子枪的聚焦系统由一系列同轴的圆筒和圆孔膜片组装而成,其作用是产生定向的和聚焦得很细的电子束,同时可以方便地控制电子束电流的大小。在显像管玻璃外壳的锥体上加有高压端子,在管内形成强电场,这个电压叫阳极电压;不同尺寸的显像管阳极电压不同,其范围可达到  $10\sim 25\text{kV}$ 。显像管中电子束的偏转是在磁场的作用下产生的,偏转线圈的作用就是使聚焦电子束在管内空间产生偏转并击打到荧光屏上。偏转线圈套在管外颈锥的转折处,偏转线圈由行和帧两个相互垂直放置的线圈组成。当分别通入行、帧锯齿波电流时,电子束就在管内从上到下、从左到右顺序偏转,电子束在屏幕上移动的轨迹形成扫描光栅。彩色显象管有三个电子枪,R、G、B三色荧光粉按“品”字形规则排列涂满荧光屏,屏后还设有均匀分布细孔的荫罩板。三个电子束通过荫罩板上的小孔打到一组三色荧光粉上,激发的红、绿、蓝色决定一个像素的亮度、色调与饱和度。图 2-41 是彩色显像管电子枪的照片。

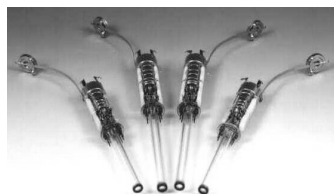


图 2-41 彩色显像管的电子枪

当偏转线圈未加扫描信号时,从显像管阴极发出的电子流经过电子枪的聚焦系统,形成电子束。电子束被高压加速后打上荧光屏,在荧光屏的中心处产生聚焦光点。当偏转线圈分别加上行和帧的扫描信号时,电子束在屏上扫出均匀发光的光栅。如果这时在电子枪的栅极加上与被摄像景物图像亮度对应的视频信号,则从电子枪发出的电子束电流不再是固定不变的,而是受到视频信号的调制。这个随时间变化、受视频信号调制的电子束经扫描展开后,打到荧光屏上,在屏上就会出现对应的明暗相间的光学图像。

### (2) 显像管的分类

按结构和尺寸,显像管有如下几种分类:

① 按屏幕尺寸分类。屏幕尺寸是指屏幕的对角线尺寸,目前可见到  $31\text{cm}$  (12 英寸)、 $35\text{cm}$  (14 英寸)、 $44\text{cm}$  (17 英寸)、 $47\text{cm}$  (19 英寸)、 $54\text{cm}$  (21 英寸)、 $64\text{cm}$  (25 英寸)、 $74\text{cm}$  (29 英寸) 和  $86\text{cm}$  (34 英寸) 等多种尺寸的显像管。

② 按管颈尺寸分类。有粗 ( $35\text{mm}$ )、中 ( $28.6\text{mm}$ )、细 ( $20\text{mm}$ ) 三种直径的管颈尺寸。粗管颈显像管的偏转能耗过大,除了在要求高分辨率的显像管中使用以外,其他场合已不采用。

③ 按偏转角分类。偏转角是扫描电子束最大的偏转角度，加大偏转角，可以缩短显像管的总长度，但不利于提高显像管的分辨率。高分辨率显像管的偏转角一般小于  $90^\circ$ 。

④ 按用途分类。可分为黑白显像管、彩色显像管；电脑显示器所用的显像管（其特点是分辨率很高）、工业和医用电视使用的各类显像管、电视投影显像管。

## 27. 液晶显示器件

利用液晶的电光效应和热光效应制成的显示器件叫做液晶显示器（LCD，Liquid Crystal Display），它是显示器件大家族中的后起之秀，由于其优越的特性，目前已广泛应用在液晶电视、便携式计算机、手机等电子设备中；随着技术的发展，液晶显示器件的应用范围正在迅速扩大。

### （1）液晶显示器件的特点

① 优点。与其他显示器件相比，液晶显示器件具有如下优点。

- a. 液晶显示器件的表面为平板型结构，能显著减少显示图像的失真。
- b. 功耗低，工作电压低（一般为  $2\sim 6\text{V}$ ），工作电流小（一般为  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ）。
- c. 易于集成，体积小，而且由于液晶显示器件的功耗很低，因此可以应用在元器件密度较大的场合。
- d. 显示信息量大。液晶显示器件的像素可以做得很小，使其单位面积内的显示信息量加大，这对于像高清晰度电视机这样的设备是最理想的选择方案。

e. 寿命极长。

f. 无电磁污染。液晶显示器件工作时，不产生电磁辐射，对环境无电磁污染。

② 缺点。当然，液晶显示器件也有缺点，主要有下述几点。

- a. 机械强度低，易于损坏。
- b. 工作温度范围窄，一般为  $-10\sim +60^\circ\text{C}$ 。
- c. 动态特性较差，响应时间和余辉时间较长（ms 级），在显示高速变化的图像时，画面上容易产生“拖尾”现象。

### （2）液晶显示器件的分类

液晶显示器件在显示方式上，可以分为正像显示和负像显示。正像显示就是显示时背景是浅色的，显示内容是深色的；而负像显示则是显示时背景是深色的，显示内容是浅色的。

液晶显示器件按显示像素可以分为段形显示器件和点矩阵显示器件两大类。点矩阵显示器件又可分为普通点矩阵显示器件和有源矩阵显示器件，其中，有源矩阵显示器件是目前常说的 TFT 液晶显示器件。

① 段形液晶显示器件。与 LED 七段显示器相似，段形液晶显示器件是字符形式的，常用的段形显示像素排列形式有六段显示形、七段显示形、八段显示形、九段显示形、十六段显示形、十八段显示形。段形液晶显示器常作为电子钟表、计算器、仪器仪表的显示器。

② 点矩阵液晶显示器件。点矩阵液晶显示器件的像素是由微小的矩形点组成的。其中，普通点矩阵方式是前后电极呈正交的两组平行线条，相互叠放，电极交点即为显示像素；有源矩阵显示器件的矩阵电极都在同一玻璃面上，另一片玻璃上只是一个公用电极。有源矩阵液晶显示器件克服了普通矩阵液晶显示器件节点像素上电容量大的缺点，所以特别适合显示电视图像等活动的画面。

液晶显示器件要在驱动电路的配合下才能工作。段形液晶显示器件的驱动电路与 LED 七数码显示器件类似，电路组成较为简单，可以用一般的数字电路芯片、通用微处理器或专用芯片组成。点矩阵液晶显示器件的驱动电路一般由通用微处理器或专用微处理器构成。液晶显示器件及

其驱动电路是紧密相连的，通常作为一个整体模块使用。

### (3) 薄膜液晶显示器

TFT (Thin Film Transistor, 薄膜晶体管), 一般代指薄膜液晶显示器, 实际上是指薄膜晶体管矩阵。在 TFT 上, 产生图像的基本原理很简单: 显示屏由许多可以发出任意颜色光线的像素组成, 控制各个像素, 使之显示相应的颜色。在 TFT LCD 中, 一般采用背光技术, 为了精确控制每一个像素的颜色和亮度, 需要在每一个像素后面安装一个类似百叶窗的开关。

TFT 显示屏一般有一个由偏光板、彩色滤光片组成的夹层, 这两层之间是液晶。偏光板、彩色滤光片决定通过的光通量以及生成光的颜色。夹层外面是两层玻璃基板, 上层玻璃基板上有着 FED 晶体管, 下层是共同电极, 两者共同作用, 生成精确控制的电场。电场决定了液晶的排列方式, 分别控制红、绿、蓝三基色。

TFT 是在玻璃或塑料基板等非单晶片上(当然也可以在晶片上)通过溅射、化学沉积工艺形成制造电路必需的各种膜, 通过对膜的加工, 制作大规模半导体集成电路。采用非单晶基板, 可以大幅度降低成本, 是传统大规模集成电路向大面积、多功能、低成本方向的延伸。在大面积玻璃或塑料基板上制造控制像素开关性能的 TFT, 比在硅片上制造大规模 IC 的技术难度更大。对生产环境的要求(净化度为 100 级)、对原材料纯度的要求(纯度为 99.999 985%)、对生产设备和生产技术的要求都超过半导体大规模集成电路, 是现代电子工业大生产的顶尖技术。

在以往的 10 年时间里, TFT LCD 迅速成长为主流显示器件。TFT LCD 显示器的主要特点如下:

① 使用特性好。低工作电压, 低驱动电压, 功耗约为 CRT 显示器的十分之一甚至更小, 节省了大量的能源; 固体化使安全性和可靠性提高; 轻薄的平板化, 节省了大量原材料和使用空间; 规格型号、尺寸系列化, 品种多样, 使用方便灵活; 维修、更新、升级容易, 使用寿命长; 能实现从最简单的单色字符图形显示, 到高分辨率、高彩色保真、高亮度、高对比度、高响应速度的各种视频显示; 显示方式有直视型、投影型、透视式和反射式。

② 环保特性好。无辐射、无闪烁, 对使用者的健康无损害。

③ 适用范围宽。从  $-20\sim+50^{\circ}\text{C}$  的温度范围内都可以正常使用, 经过温度加固处理的设备, 低温工作温度能达到  $-80^{\circ}\text{C}$ 。既可作为移动终端、台式终端, 又可以作为大屏幕投影电视, 是性能优良的全尺寸视频显示终端。

④ 制造技术高。TFT LCD 产业技术日趋成熟, 大批量生产的成品率已经达到 90% 以上。

⑤ TFT LCD 易于集成化和更新换代, 是大规模半导体集成电路技术和光源技术的完美结合, 发展潜力很大。目前, 玻璃基板的和塑料基板的, 非晶、多晶、单晶硅和其他材料的 TFT LCD 都在研制和生产之中。

## 28. 接插件

按照接插件的工作频率分类, 低频接插件通常是指适合在频率 100MHz 以下工作的连接器。而适合在频率 100MHz 以上工作的高频接插件, 在结构上需要考虑高频电场的泄漏、反射等问题, 一般都采用同轴结构, 以便与同轴电缆连接, 所以也称为同轴连接器。

按照外形结构特征分类, 常见的有圆形接插件、矩形接插件、印制板接插件、带状电缆接插件等。

### (1) 圆形接插件

圆形接插件, 其插头具有圆筒状外形, 插座焊接在印制电路板上或紧固在金属机箱上, 插头与插座之间有插接和螺接两类连接方式; 它被广泛用于系统内各种设备之间的电气连接。插接方

式的圆形接插件用于插拔次数较多、连触点数少且电流不超过 1A 的电路连接，常见的台式计算机键盘、鼠标插头（PS/2 端口）就属于这一种。

螺旋方式的圆形接插件俗称航空插头、插座，见图 2-42。它有一个标准的螺旋锁紧机构，特点是触点多、插拔力较大、连通电流大、连接较方便、抗振性极好，容易实现防水密封及电磁屏蔽等特殊要求。这类连接器的触点数目从两个到多达近百个，额定电流可从 1 安培到数百安培，工作电压均在 300~500V 之间。

### （2）矩形接插件

矩形接插件见图 2-43。矩形接插件的体积较大，电流容量也较大，并且矩形排列能够充分利用空间，所以这种接插件被广泛用于印制电路板上安培级电流信号的互相连接。有些矩形接插件带有金属外壳及锁紧装置，可以用于机外的电缆之间和电路板与面板之间的电气连接。

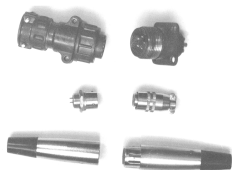


图 2-42 圆形接插件

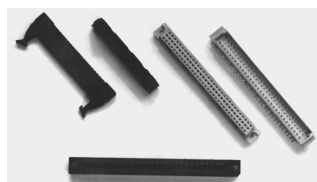


图 2-43 矩形接插件

### （3）印制板接插件

印制板接插件如图 2-44 所示，用于印制电路板之间的直接连接，外形是长条形，结构有直接型、绕接型、间接型等形式。插头由印制电路板（“子”板）边缘上镀金的排状铜箔条（俗称“金手指”）构成；插座根据设计要求订购，焊接在“母”板上。“子”电路板插入“母”电路板上的插座，就连接了两个电路。印制板插座的型号很多，主要规格有排数（单排、双排）、针数（引线数目，从 7 线到近 200 线不等）、针间距（相邻触点簧片之间的距离）以及有无定位装置、有无锁定装置等。从台式计算机的主板上最容易见到符合不同的总线规范的印制板插座，显卡、声卡等就是通过这种插座与主板实现连接的。

### （4）同轴接插件

同轴接插件又叫做射频接插件或微波接插件，用于传输射频信号、数字信号的同轴电缆之间连接，工作频率可达数千兆赫以上，如图 2-45 所示。Q9 型卡口式同轴接插件常用于示波器的探头电缆连接。

### （5）带状电缆接插件

带状电缆插头是电缆两端的连接器，它与电缆的连接不用焊接，而是靠压力使连接端内的刀口刺破电缆的绝缘层实现电气连接，工艺简单可靠，如图 2-46 所示。带状电缆接插件的插座部分直接装配焊接在印制电路板上。

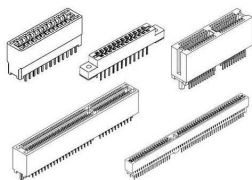


图 2-44 印制板接插件

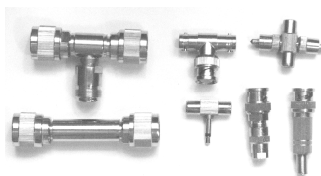


图 2-45 同轴接插件

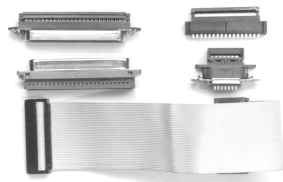


图 2-46 带状电缆接插件

带状电缆接插件用于低电压、小电流的场合，能够可靠地同时传输几路到几十路数字信号，但不适合用在高频电路中。在高密度的印制电路板之间已经越来越多地使用了带状电缆接插件，特别是在微型计算机中，主板与硬盘、软盘驱动器等外部设备之间的电气连接几乎全部使用这种接插件。

#### (6) 插针式接插件

插针式接插件常见的有两类，如图 2-47 所示。图 (a) 为民用消费电子设备常用的插针式接插件，插座可以装配焊接在印制电路板上，插头压接（或焊接）导线，连接印制板外部的电路部件。例如，电视机里可以使用这种接插件连接开关电源、偏转线圈和视放输出电路。图 (b) 所示为数字电路中常用的接插件，其插头、插座分别装焊在两快印制电路板上，用来连接两者。这种接插件比标准的印制板体积小，连接更加灵活。

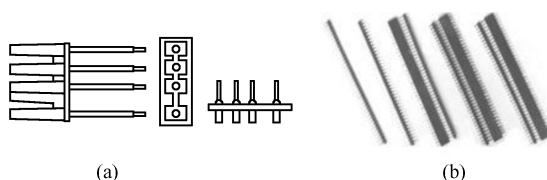


图 2-47 插针式接插件

#### (7) D 形接插件

D 形接插件的端面很像字母 D，具有非对称定位和连接锁紧机构，如图 2-48 所示。常见的触点数有 9、15、25、37 等几种，连接可靠，定位准确，用于电器设备之间的连接。典型的应用有计算机的 RS-232 串行数据接口和 LPT 并行数据接口（打印机接口）。

#### (8) 条形接插件

条形接插件如图 2-49 所示，广泛用于印制电路板与导线的连接。接插件的插针间距有 2.54mm（额定电流 1.2A）和 3.96mm（额定电流 3A）两种，工作电压 250V，接触电阻约 0.01Ω。插座焊接在电路板上，导线压接在插头上，压接质量对连接可靠性的影响很大。这种接插件保证插拔次数约 30 次。



图 2-48 D 形接插件

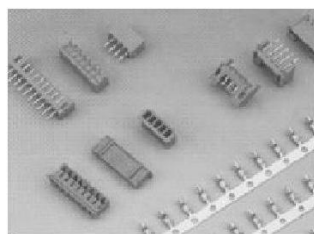


图 2-49 条形接插件

#### (9) 音频/视频接插件

音频/视频接插件也称 AV 连接器，用于连接各种音响设备、摄录像设备、视频播放设备，传输音频、视频信号。音频/视频接插件有很多种类，常见的有耳机/话筒插头座和莲花插头座。

耳机/话筒插头、插座比较小巧，用来连接便携式、袖珍型音响电子设备，如图 2-50 (a) 所示。插头直径  $\phi 2.5\text{mm}$  的用于微型收录机耳机， $\phi 3.5\text{mm}$  的用于计算机多媒体系统输入/输出音频

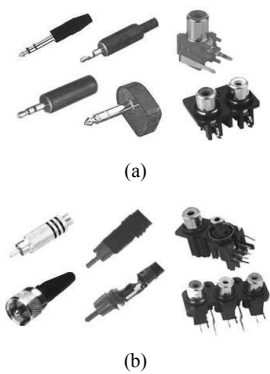


图 2-50 音频/视频接插件

信号， $\phi 6.35\text{mm}$  的用于台式音响设备，大多是话筒插头。这种接插件的额定电压  $30\text{V}$ ，额定电流  $30\text{mA}$ ，不宜用来连接电源。一般使用屏蔽线作为音频信号线与插头连接，可以传送单声道或双声道信号。

莲花插头、插座也称同心连接器，它的尺寸要大一些，如图 2-50 (b) 所示。插座常被安装在声像设备的后面板上，插头用屏蔽线连接，传输音频和视频信号。选用视频屏蔽线要注意导线的传输阻抗与设备的传输阻抗相匹配。这种接插件的额定电压为  $50\text{V}$  (AC)，额定电流为  $0.5\text{A}$ 。

(10) 直流电源接插件

如图 2-51 所示，这种接插件用于连接小型电子设备的便携式直流电源，例如笔记本电脑的电源适配器都是使用这类接插件连接。插头的额定



图 2-51 直流电源接插件

定电流一般在  $2\sim 5\text{A}$ ，尺寸有三种规格，外圆直径 $\times$ 内孔直径为  $3.4\text{mm}\times 1.3\text{mm}$ 、 $5.5\text{mm}\times 2.1\text{mm}$ 、 $5.5\text{mm}\times 2.5\text{mm}$ 。

29. 开关

传统的开关都是手动式机械结构的，由于构造简单、操作方便、价廉可靠，使用十分广泛。随着新技术的发展，各种非机械结构的电子开关，如气动开关、水银开关以及高频振荡式、感应电容式、霍尔效应式的接近开关等，正在不断出现。但它们已经不是传统意义上的开关，往往包括了比较复杂的电子控制单元。

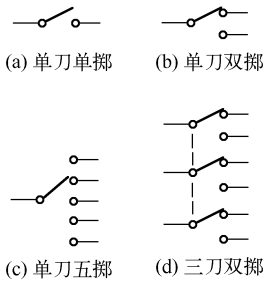


图 2-52 开关的“刀”与“掷”

这里只简要介绍几种机械类开关。由开关机械结构带动的活动触点俗称“刀”，也称“极”，对应同一活动触点的静触点数（即活动触点各种可能的位置）俗称“掷”，也称“位”。因此，开关的性能规格常用“ $\times$ 刀 $\times$ 掷”或“ $\times$ 极 $\times$ 位”来表示，如图 2-52 所示。

(1) 开关的种类

开关是在电子设备中用于接通或切断电路的广义功能元件，种类繁多，分类方式见表 2-22。

表 2-22 电子设备中常用开关的分类

分类方法	动作方式或结构	开关种类
按机械动作方式或结构分类	旋转式	旋转片式
		凸轮开关
		刷形开关
		拨盘编码开关
		组合开关
	按动式	单按钮开关
		组合按钮开关
	扳钮式	钮子开关
		波形开关
	双列直插式	拨动开关
		滑动开关
		钮柄开关



续表

分 类 方 法	动作方式或结构	开 关 种 类
按机械动作方式或结构分类	滑动式	拨动开关
		推拉开关
		杠杆开关
	键盘式	琴键开关
		触摸开关
		薄膜开关
按使用方法分类	手动或机械控制	微动开关
		电子开关
		电源开关
		波段开关
		多位开关
		转换开关
		拨码开关
	非电物理量控制	光电开关
		磁控开关
		压力开关
		延时开关
		温控开关
		声控开关
按驱动方式分类	手动	
	机械控制	
	声、光、磁、温度控制	

## ① 旋转式开关。

a. 波段开关。如图 2-53 所示, 分为大、中、小型三种。波段开关靠切入或咬合实现接触点的闭合, 可有多刀位、多层型的组合, 绝缘基体有纸质、瓷质或玻璃布环氧树脂板等几种。旋转波段开关的中轴带动它各层的接触点联动, 同时接通或切断电路。波段开关的额定工作电流一般为  $0.05\sim 0.3\text{A}$ , 额定工作电压为  $50\sim 300\text{V}$ 。



图 2-54 刷形开关

b. 刷形开关。如图 2-54 所示, 靠多层簧片实现触点的摩擦接触, 额定工作电流可达  $1\text{A}$  以上, 也可分为多刀、多层的不同规格。



图 2-53 波段开关

## ② 按动式开关。

a. 按钮开关。它可分为大、小型, 形状多为圆柱体或长方体, 其结构主要有簧片式、组合式、带指示灯和不带指示灯的几种。

按下或松开按钮开关, 电路则接通或断开, 常用于控制电子设备中的电源或交流接触器。

b. 键盘开关。如图 2-55 所示的键盘开关多用于计算机(或计算器)中数字式电信号的快速通/断。键盘有数码键、字母键、符号键及功能键, 或是它们的组合。触点的接触形式有簧片式、导电橡胶式和电容式等多种。



图 2-55 键盘开关

c. 直键开关。俗称琴键开关, 属于摩擦接触式开关, 有单键的, 也有多

键的,如图 2-56 所示。每一键的触点个数均是偶数(二刀、四刀、……,十二刀);键位状态可以锁定,也可以是无锁的;可以是自锁的,也可以是互锁的(当某一键按下时,其他键就会弹开复位)。

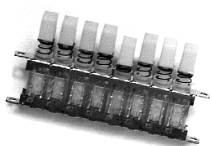


图 2-56 直键开关

### ③ 拨动开关。

a. 钮子开关。图 2-58 所示的钮子开关是电子设备中最常用的一种开关,

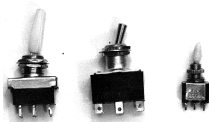


图 2-58 钮子开关

有大、中、小型和超小型的多种,触点有单刀、双刀及三刀等几种;接通状态有单掷和双掷两种,额定工作电压一般为 250V。

b. 拨动开关。如图 2-59 所示的拨动开关,一般为水平滑动式换位,切入咬合式接触,常用于计算器等民用电子设备中。



图 2-57 波形开关

### (2) 开关的主要技术参数

① 额定电压。正常工作状态下所能承受的最大直流电压或交流电压有效值。

② 额定电流。正常工作状态下所允许通过的最大直流电流或交流电流有效值。

③ 接触电阻。一对接触点连通时的电阻。一般要求 $\leq 20\text{m}\Omega$ 。

④ 绝缘电阻。不连通的各导电部分之间的电阻。一般要求 $\geq 100\text{M}\Omega$ 。

⑤ 抗电强度(耐压)。不连通的各导电部分之间所能承受的电压。一般开关要求 $\geq 100\text{V}$ ,电源开关要求 $\geq 500\text{V}$ 。

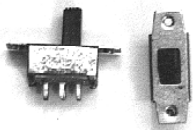


图 2-59 拨动开关

⑥ 工作寿命。在正常工作状态下使用的次数。一般开关为 5 000~10 000 次,高可靠开关可达 $5 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$  次。



图 2-60 接线柱

### 30. 接线柱

如图 2-60 所示的接线柱常用作仪器面板的输入、输出端口,种类很多。

### 31. 接线端子

接线端子常用于大型设备的内部接线,如图 2-61 所示。

## 2.1.2.2 电子元器件的失效规律

电子元器件的工作寿命结束,叫做失效。其失效的过程通常是:随着时间的推移或工作环境的变化,元器件的规格参数发生改变(如电阻器的阻值变大或变小,电容器的容量减小等);当它们的规格参数变化到一定限度时,尽管外加的工作条件没有改变,却再也不能承受电路的要求而彻底损坏,使它们的特性参数消失(如二极管被电压击穿而短路,电阻因阻值变小而超负荷烧断等)。显然,这是一个“从量变到质变”的过程。

### 1. 普通电子元器件的失效规律

阻容元件、继电器等普通电子元器件,在大量使用后发现它们有相似的失效规律,图 2-62 表示了典型元器件的失效率与工作时间的关系。从图中可以清楚地看出,在早期失效率、偶然失

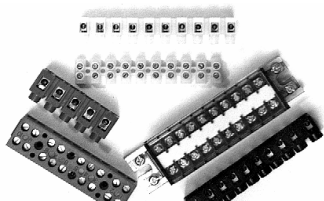


图 2-61 接线端子

效期、老化失效期内, 电子元器件的失效率是大不一样的, 其变化的规律就像一个浴盆的剖面, 所以这条曲线常被称为“浴盆曲线”。

### (1) 早期失效期

新制造出来的在刚刚投入使用的一段时间内, 失效率比较高, 这种失效称为早期失效, 相应的这段时间叫做早期失效期。由于设计、制造上的缺陷等原因而失效。通过对原材料和生产工艺加强控制, 可以大大减少早期失效比例。在生产中对元器件进行筛选老化, 可以保证筛选后的元器件有较低的失效率。

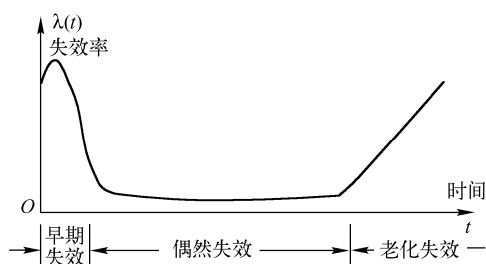


图 2-62 典型普通元器件失效曲线

### (2) 偶然失效期

在经过早期失效期以后, 电子元器件将进入正常使用阶段, 其失效率会显著地迅速降低, 这个阶段叫做偶然失效期。也称随机失效期。其特点是失效率高而基本稳定, 可以认为失效率是一个常数, 与时间无关, 但失效是随机性质的。

偶然失效期时间较长, 元器件都工作在偶然失效期。正规化的元器件制造厂商都要采用各种试验手段, 把电子元器件的早期失效消灭在设备出厂之前, 并把它们在正常使用阶段的失效率作为向用户提供的一项主要参数。

由于  $\lambda(t)$  为常数, 可靠性用可靠度  $R(t)$  表示, 它们的关系为:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2-14)$$

式 (2-14) 说明了正常工作概率 (可靠度) 在时间上是按指数衰减的。因此, 要获得较高的可靠度, 设备的工作时间应远小于设备的平均寿命, 也就是工作时间越短, 其可靠性越高。

### (3) 耗损失效期

设备在使用的后期, 由于老化、疲劳、耗损等原因引起的失效叫做耗损失效。主要发生耗损失效的时期叫做耗损失效期, 又做老化失效期, 其特点是失效率随时间迅速增加。到了这个时期, 大部分元器件都开始失效, 设备迅速报废。在电子设备中, 所有的元器件和组件都不能工作于耗损失效期。

## 2. 半导体器件的失效规律

半导体器件寿命长、稳定可靠, 所以其失效特性有特殊的地方, 如图 2-63 所示。

早期失效和一般元件相同, 失效率随时间增加迅速下降。失效原因通常是由于原材料缺陷和工艺因素所引起。在偶然失效期, 失效率高且随时间递减。这一时期失效率近似为一常数, 是半导体器件最好的工作时期。半导体器件没有耗损失效期, 这是其特殊性所在。类似半导体器件失效规律的电子元器件还

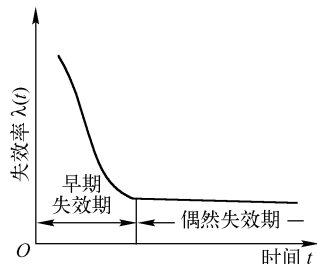


图 2-63 典型半导体器件失效曲线

有固体钽电解电容器。

2.1.2.3 元器件的可靠性

电子元器件的可靠性保证要求有两种表征方式，即失效率等级和设备保证等级。前者用于大多数（并非全部）电子元件可靠性水平的评定，后者则用来评价电子器件（包括部分电子元件）的可靠性保证水平。

1. 元件的失效率等级

我国于 1979 年发布了国家标准 GB/T 1772—79《电子元器件失效率试验方法》，规定了失效率等级，该国标是参照采用了美国军用标准 MIL—STD—690B（1968）而制定的，一直沿用到 20 世纪 90 年代初期。1996 年发布了国家军用标准 GJB2649—96，该国家军标等效采用了美国军用标准 MIL—STD—690C（1993）。目前大多数列入合格设备目录（QPL）中有可靠性指标的元件，仍沿用 GB/T 1772—79 规定的失效率等级，两者的失效率等级代号很容易混淆；现将这两个标准失效率等级的分类及代号同时列于表 2-23，供比较。

表 2-23 失效率等级

失效率等级名称	失效率等级代号		最大失效率（1/h 或 1/10 次）
	GB/T 1772—79	GJB 2649—96	
亚五级	Y	L	$3 \times 10^{-5}$
五级	W	M	$10^{-5}$
六级	L	P	$10^{-6}$
七级	Q	R	$10^{-7}$
八级	B	S	$10^{-8}$
九级	J	—	$10^{-9}$
十级	S	—	$10^{-10}$

2. 设备保证等级

作为另一种表征方式的设备保证等级，则与失效率等级表征方式有较大不同。一是设备保证等级没有直观的量化数值；二是不同设备保证等级有不同的保证要求。采用设备保证等级表征可靠性水平的设备最典型的是半导体器件，包括集成电路。在 GJB33《半导体器件总规范》中明确规定设备保证等级为 JP（普军级）、JT（特军级）、JCT（超特军级）。在某些电子元件的总规范中虽未明确指出设备保证等级，实际上设备保证等级为一级——J（军级）；还有的规范明确规定供宇航用，如 GJB599《耐环境快速分离高密度圆形电子连接器件总规范》中明确规定供宇航用，即设备保证等级为宇航级。

对不同设备保证等级规定有不同的保证要求。保证要求的多少和严格程度的高低，决定了保证等级的高低。但应当指出，并不是所有的军用标准或规范都明确标明设备保证等级。当标准和规范只包括一个等级或只包括一个且属较低等级时，标准和规范就仅规定设备鉴定和质量一致性检验要求，而未明确保证等级，因为等级仅用来区别表示两个或两个以上的等级。

电子元器件的设备保证要求所包括的典型内容有设备保证大纲审查、工厂或生产线认证、设备鉴定检验、可追溯性、生产过程检验、筛选以及质量一致性检验等。设备保证等级愈高，所涉及的保证要求内容愈多和愈严。如用于航天的设备保证等级（S 级集成电路，JANS 级半导体分立器件）的设备保证要求，就涉及了上述内容的全部；而用于航空或类似应有场合的设备保证等级的设备保证要求，在保证要求内容和严格程度上则少于和低于航天用设备保证等级。而不以失效

率表示可靠性的元件规范中规定的设备鉴定和质量一致性检验,即是属于设备保证要求内容最少的设备保证等级,标准和规范根据应用场合的不同,在鉴定和质量一致性检验中规定的项目多少和严酷度高低也是不同的。

### 2.1.3 电子设备的系统可靠性

一个复杂的系统可以由若干个子系统或部件组成,而每个子系统或部件又由许多元器件组成。系统和子系统(或部件、元器件)之间的可靠性关系可以分为串联系统和冗余系统(备份系统)两大类。

(1) 串联系统。特点:只要其中有一个失效,系统就失效。例如,电子计算机中只要有一块电路失效,计算结果就会出错。如果这些元件是相互独立的,即某一元件失效对其他元件没有影响,根据概率论的乘法定理,串联系统的可靠性等于各元件可靠性的乘积。

(2) 冗余系统。当串联系统的可靠性设计不能满足预定要求时,可以采用备份元件或备份系统的方法提高可靠性水平,这称为冗余系统或备份系统。采用冗余系统必然会增加系统的体积和重量,增加成本和复杂性,一般只在极端重要的场合(如导弹制导、原子弹引信及卫星设备等)才采用,或者在元器件可靠性满足不了系统的要求时采用。

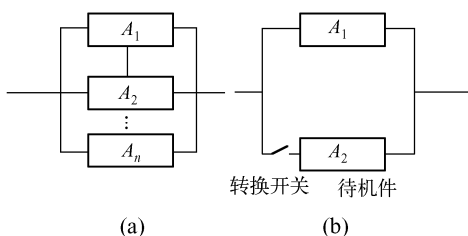


图 2-64 冗余系统

并联系统是最常用的冗余系统,如图 2-64 (a) 所示。

它的特点是:只要系统中任一个元件(或子系统)可靠,则系统就可靠,只有所有元件(或子系统)全部失效时,系统才失效。

根据概率论的加法定理,可以得到两个元件并联的可靠度为:

$$R(C) = R(A_1) + R(A_2) - R(A_1 \times A_2) \quad (2-15)$$

如果系统是由两个元件组成的并联系统,每个元件的可靠度为 90%,则系统的可靠度为 99%。可见,并联系统的可靠度大于并联元件(或子系统)的可靠度。

又如,某军用通信机在作战时因敌方干扰,其通信可靠度为 0.8,为了提高通信可靠程度,同时使用两台通信机,其可靠度为 0.96;三台通信机同时使用时,其可靠度为 0.992。此例说明,备份越多,可靠性越高。但三台通信机同时使用(其中两台为备份),其可靠度只比一台通信机提高 19.2%,而设备费用却增加 2 倍。因此,在一般情况下,不希望采用备份,应着重提高基础件(或子系统)的可靠性水平。

待机系统也是一种冗余系统,如图 2-64 (b) 所示。这种系统中的备份元件或备份系统,在平时处于非工作状态,一旦主要元件出现故障后,备份件立即投入工作。系统一般要装有失效报告装置和开关转换装置,在系统发生故障时能自动转换备份件,因此转换装置的可靠性要求很高,否则就失去了备份作用。

## 2.2 可靠性设计方法和措施

### 2.2.1 可靠性设计方法

#### 2.2.1.1 可靠性设计程序

为了使可靠性设计工作的基本要求、基本内容在设计过程中能有计划、有步骤地落到实处,

便于随时进行检查、监督和控制,有必要把可靠性设计的任务和内容编写成工作程序,作为设计阶段的一项质量保证措施。

### 1. 调查研究阶段

主要是在收集资料的基础上确定可靠性指标。

### 2. 总体方案确定阶段

确定应采取的可靠性设计措施,并进行可靠性预计和可靠性分配。

#### (1) 可靠性预计

可靠性预计是在设计阶段,根据设计中所选用的电路程式、元器件、可靠性结构模型、工作环境、工作应力以及过去积累的统计数据,推测设备可能达到的可靠性水平。预计的目的不是在于了解在什么时候将发生什么样的失效,而是在于从设计开始就采取措施以防止失效的发生,并用定量的方法评价可靠性设计的效果。

可靠性预计的方法一般有相似设备法、相似电路法、有源器件法、元器件计数法及元器件应力分析法等。它们分别适用于不同的设计阶段:当设备处于方案论证阶段时,可用相似设备法、相似电路法、有源器件法等快速预计法进行可行性预计,以评价设计方案的可行性;当设备处于详细设计阶段时,可用元器件计数法进行初步设计预计,用元器件应力分析法进行详细的设计预计,以便及时发现设计的薄弱环节或潜在能力,及时改进设计,以期达到优化设计的目的。下面就三种预计方法作一些简略的介绍:

① 有源器件法。即按设备为完成规定功能所需的串联有源器件的数目预计设备失效的方法。预计公式为

$$\lambda_s = N \cdot K \quad (2-16)$$

式中  $\lambda_s$  为设备的预计失效率;  $N$  为串联有源器件的数目;  $K$  为各种设备中每个有源器件的失效率。

② 元器件计数法。此法是根据组成设备的各类元器件的通用失效率及其使用数量,来预计设备的失效率。

③ 元器件应力分析法预计。这是考虑了温度、电应力、环境条件、元器件选用及电路等情况对元器件失效率的影响,先预计各个元器件在上述诸因素影响下的失效率,然后再预计设备总的失效率的一种方法。除微电子器件外,绝大多数电子元器件的工作失效率预计公式为:

$$\lambda_p = \lambda_b (\pi_E \cdot \pi_Q \cdots \pi_n) \quad (2-17)$$

式中  $\lambda_p$  为元器件的工作失效率;  $\lambda_b$  为元器件的基本失效率;  $\pi_E$  为环境修正系数;  $\pi_Q$  为元器件质量修正系数;  $\pi_n$  为考虑其他附加影响的修正系数。

在进行应力分析法可靠性预计时,需要对每个元器件给出失效率和各修正系数的数值,要进行大量繁杂的计算,最宜于采用计算机辅助分析和计算。

#### (2) 可靠性分配

可靠性分配是将可靠性指标或预计所能达到的目标值加以分解,用科学的方法,合理分配给分系统、设备、部件直至各元器件和每一个连触点、焊触点,以保证可靠性既定目标得以实现。通过分配,不仅可以层层落实设计指标,还可发现设计的薄弱环节和尚能挖掘的潜力。

可靠性分配一般分为两大类,一类是无约束条件,单纯从可靠性指标出发进行分配;另一类是有约束条件,即以体积、重量、成本等为约束条件进行最优化可靠性分配。

等分法即是平均分配法,适用于由完全相同的单元电路构成的串联系统,其分配公式为:

$$\lambda_i = \lambda_s / m \quad (2-18)$$

式中  $\lambda_i$  为第  $i$  分系统的失效率;  $\lambda_s$  为系统的失效率;  $m$  为分系统的数目。

AGREE 分配法是由美国电子设备可靠性顾问团提出的一种分配方法。它考虑了组成系统的每个单元的复杂度和重要度。这种分配方法的基本观点是：越是复杂的单元越容易失效，分配给它的失效率应该大一些；越是重要的单元越不希望它失效，故分配给它的失效率应该小一些，即分配时每个单元的失效率应该是加权的，加权因子  $C$  应该与单元的复杂度成正比，与单元的重要度成反比，于是 AGREE 方法的分配公式为：

$$\lambda_i = (n_i \times T \times \lambda_s) / (N \times W_i \times t_i) \quad (2-19)$$

式中  $n_i$  为第  $i$  单元的元器件数； $N$  为系统的元器件总数， $n_i/N$  表示第  $i$  单元的复杂度； $W_i$  为第  $i$  单元的重要度； $T$  为系统的任务周期； $t_i$  为第  $i$  单元在任务周期内的工作时间； $\lambda_s$  为系统的失效率； $\lambda_i$  为第  $i$  分系统的失效率；

### 3. 设计研制阶段

#### (1) 进行环境影响因素试验

将设备置于人工模拟的工作环境之中，按照技术指标的要求，考核产品抵抗每一种环境影响因素的能力。如耐温、耐湿和耐压的稳定性；不渗水性以及耐振动、冲击、加速度等各种稳定性项目的试验。

综合性试验考验产品在综合环境因素的作用下，所能达到的性能指标。这种试验比较接近于实际使用情况，所以在环境试验中占有重要地位。

应该指出，对于各种产品环境试验条件的拟定，必须根据具体的使用情况来考虑。例如，产品的循环试验，对不同的试验顺序所产生的试验结果就不一样。以气候因素的循环试验为例，其顺序为高温、潮湿、低温。设备先在烘箱中进行加温，使元器件受热干燥；然后，将其放进潮湿箱，在毛细力作用下，使元器件吸潮；最后置于冷冻箱中冷却，由于热胀冷缩的作用，如果产品存在质量问题，必将引起破裂。

#### (2) 采用备分系统（冗余系统）

把单个元件或整套系统并联起来作为备用，这是提高可靠性的一种有效手段。

#### (3) 在电子线路上采取措施

例如，采用经过试验的、可靠的标准路线；对外购元件进行筛选，尽量使用优选、专用元器件，或将元器件减载使用；尽量简化系统，或采用模块化集成电路、大规模集成电路以提高电路系统的可靠性。

#### (4) 设计故障指示和排除装置

加强对环境保护措施的研究。例如，采用有效的散热装置，控制元器件的温升；削减机械因素对设备造成的危害，排除内部与外部的噪声干扰；加强防腐、防潮、防霉的研究，提高结构材料使用寿命；结构设计实现标准化、系列化、通用化等。

### 4. 定型阶段

所设计的设备总会存在着事先意想不到的初期设计缺陷、工程缺陷以及制造上的各种缺陷，设计时所选用的元器件也可能不完全合适。缺陷虽不一定是故障，但它的存在及发展迟早能引起故障，故在可靠性工程中，除了应用 FMECA 和 FTA 等分析方法，还必须采用可靠性增长试验的方法，即给样机施加一定的应力，强迫暴露设计缺陷，使缺陷变成故障，并对故障进行仔细分析，找出故障机理，通过进行再设计来系统地、永久地消除故障机理，阻止同样的故障再度出现。这个试验-分析-改进的过程，就是可靠性增长过程或称为可靠性增长试验过程。这个过程每进行一次，样机的可靠性就增值一次，经过多次反复，直到实现设计的固有可靠性。

可靠性增长试验既适用于设计研制和生产定型阶段，也适用于批量生产阶段。但重点是在设计研制和生产定型之前进行，因为那时的设备尚处于可以再设计阶段，比起投入批量生产以后的

设备，在设计上做出修改的困难程度和所需费用都小得多。

为了在可靠性增长试验活动中能严密地、有效地监控和跟踪可靠性的变动情况，有必要把可靠性增长定量化。由于可靠性增长活动是对设备不断进行试验和采取积极的改进活动，因而，反映设备质量的母体水平也在不断变动之中，所以可靠性增长的定量化需要应用变动母体的统计分析方法，这就是可靠性增长的数学模型。它用一个作为时间函数的数学公式来表示增长过程中设备的可靠度，用以往各次增长试验的数据（可以来自不同母体），拟合出可靠性增长的数学模型，用以表达设备可靠性的增长规律，估计当前的可靠性水平，预测以后可能达到的可靠性水平，因而是可靠性增长试验的重要工具。目前已提出的有 10 余种可靠性增长模型。

设备的可靠性增长程度取决于通过增长试验是否能把设计和制造中的潜在缺陷暴露出来，以及对这些缺陷的分析和改进程度。

### 2.2.1.2 可靠性评价分析

在设计过程中，应不断对设备的可靠性进行定性和定量的评价分析，以便及时了解设备的可靠性指标是否有保证；所采取的各种可靠性设计措施是否有效，有效程度如何；设计中是否还存在薄弱环节和潜在缺陷；设备在今后使用中可能会发生什么样的故障，以及故障一旦发生，其影响和危害程度如何，等等。弄清以上问题将有助于及时发现缺陷，及时改进设计，防止“带病”投产，保证预定的可靠性指标得到满足。

#### 1. 失效模式、效应与危害度分析

失效模式、效应与危害度分析简称 FMEC（Failure Mode Effect and Criticality）。它是一种广泛适用于电子、电器以及机械设备的可靠性评价分析技术，其目的是通过对所设计的系统的各组成单元可能发生各种失效模式对系统功能的影响及其危害程度的分析，尽早发现问题、及时采取对策、改进设计，以保证设备的可靠性。

失效模式是指元器件、零部件或设备失效的表现形式。失效模式一般是能被观察到的一种失效现象。各种失效模式对设备或系统产生的后果称为效应；效应又分为局部效应和最终效应，其严重程度称为严酷度。

表 2-24 列出了常用严酷度等级及其损坏概率。

表 2-24 常用严酷度等级及其损坏概率

等 级	程 度	损 坏 概 率
IV	可能导致系统功能全部丧失，给系统和周围环境造成重大损失，或（和）造成人身伤亡事故	1
III	可能导致系统功能全部丧失，从而给系统和环境造成重大破坏，但不造成人身伤亡事故	0.5
II	导致系统功能下降，但对系统和人不会造成损害事故	0.1
I	导致系统功能下降，但对系统和环境不造成损害，对人员无害	0

#### 2. 失效树分析

失效树是一种树状的因果逻辑关系图。它是一系列事件符号和逻辑门符号，描述系统中各种事件之间的因果关系。逻辑门的输入事件是输出事件的“因”，而输出事件是输入事件的“果”。它由顶事件、中间事件、底事件和逻辑或门、逻辑与门等符号组成。

失效树分析简称 FTA（Fault Tree Analysis），是一种广泛适用于电子、电器以及机械设备的可靠性评价分析技术。它是在系统设计过程中通过对系统可能造成失效的各种因素（包括硬件、软件、环境、人为因素等）进行分析，画出逻辑框图（即失效树），从而确定系统失效原因的各



种可能组合方式及其发生概率,进而计算出系统的失效概率,以便采取相应的纠正措施,提高系统的可靠性。

失效树分析可以是定性的,也可以是定量的。一般步骤如下:

- (1) 了解系统,确定顶事件。
- (2) 建造失效树,并加以简化和规范化。
- (3) 定性分析,确定失效树的最小割集。
- (4) 收集定量分析用的数据,如底事件的失效概率、失效率、维修率等。
- (5) 定量分析,计算顶事件的发生概率和系统可靠度、评价顶事件的严重性与危害度,计算底事件和最小割集的重要度等。
- (6) 确定薄弱环节和关键元部件。改进系统的可靠性、安全性。
- (7) 进行技术经济分析、方案比较与决策等。

### 2.2.1.3 可靠性设计评审

所谓可靠性设计评审,即是在设备设计过程中的一定阶段或在设计基本完成时,组织有关方面的专业技术人员,对可靠性设计工作进行审查和评定。它是以集体的智慧来弥补设计者的不足,使设计的方案和内容更臻于合理和完善。因此,它既是可靠性设计过程一项必要的管理内容,又是进一步提高可靠性的一项有效而又经济的措施。

#### 1. 评审人员

评审小组应由总工程师、设备设计师、可靠性工程师、质量师、工艺师、部品工程师、经销商、成本核算员、计划员和标准化人员等组成。他们的任务见表 2-25。

表 2-25 评审小组

参 加 者	人 数	任 务
总工程师	1 名	主持会议、参加评审、做出裁定
可靠性师	1~2 名	参加评审、整理评审报告
质量师	1 名	参加评审、介绍样机试验情况
工艺师	1~2 名	参加评审、介绍设备可生产性情况
部品师	1 名	参加评审、介绍新选用零件认定情况
设计师	若干名	参加评审、汇报设计过程、解答问题
经销商	1 名	参加评审、反映用户使用意见及要求
计划员	1 名	参加评审、介绍设计计划进度情况
标准化员	1 名	参加评审、介绍该设备标准化情况
经济员	1 名	参加评审、介绍研制费用,设备成本
车间代表	1 名	参加评审、介绍试制或试生产情况

#### 2. 评审程序

(1) 初审在总体方案制订阶段进行 主要是对总体方案、关键元器件试验、初步的可靠性预计和可靠性分配进行评审。

(2) 复审在样机设计阶段进行 主要对元器件的应力分析、失效模式及致命度分析和样机试验情况进行评审。

(3) 终审(I)在设计定型阶段进行 主要对设计修改后的结果、故障分析与改进措施、各项规定的测试和试验结果等进行评审。

(4) 终审(Ⅱ)在生产定型阶段进行, 主要对生产可行性、生产过程中质量保证措施的建立, 以及试生产设备的各项试验情况等进行评审。在每一个评审阶段, 有关部门应向评审小组提供该阶段应具备的相应文件、资料、报告或实物等。

### 3. 评审内容和评审结果的处理

明确评审的内容与要求, 对评审小组成员和设备设计师来说, 都是十分重要的。对不同的设备应有不同的内容和要求。对评审结果可用两种方法加以评定: 一是定性评定, 就是用评审通过与否来评定, 这种评定一般适用于初审和复审阶段; 二是定量评定, 它是对评审内容逐项进行评分, 然后得出评审总得分, 再根据总得分的高低评出优、良、中、差四个等级。被评为优、良的设备给予通过, 准予定型; 被评为中的设备, 应对某些单项分较低的项目做出改进之后给予通过并准予定型; 而对被评为差的设备, 不予定型。不管被评定哪一个等级, 凡评审中提出必须改进的问题, 设计师均应认真对待, 提出措施限期改进。

#### 2.2.1.4 电子设备可靠性试验

电子设备的可靠性指标是一些综合性、统计性的指标, 与质量性能指标完全不同, 不可能用仪表、仪器或其他手段得到结果, 而是要通过试验, 从试验的过程中取得必要的数, 然后通过数据分析和处理才能得到可靠性指标的统计值。可靠性指标的实现主要依靠现场试验或模拟现场条件试验, 所以可靠性试验不同于一般设备的性能试验。从广义上讲, 为了了解、评价、分析和提高电子设备的可靠性水平而进行的试验, 可以用来确定电子设备在各种环境条件下工作或储存的可靠性的特征值。

##### 1. 可靠性试验方案设计

###### (1) 试验的目的和要求

电子设备的可靠性试验可以分为研制阶段的试验、可靠性验收试验、可靠性增长试验、元器件老炼试验、极限试验、负荷及过负荷试验、过载能力试验等, 这类试验的目的是了解设计是否满足可靠性指标的要求, 找出或排除设计与制造过程中的缺陷和不足, 证明设计可靠性能否实现, 因而可靠性试验可以根据设备研制过程中的不同阶段、不同要求进行各种不同的试验。对于不同的电子设备, 所要达到的目的不同, 可以进行的可靠性试验形式也就各异, 因此, 可靠性试验对于电子设备来说是一个系统工程。

###### (2) 试验样机数量

对于可靠性增长试验, 试验样机多一些是必要的, 对鉴定和接收试验来说, 样机多一些可以提高试验结果的置信度。一般鉴定试验不足三台则全数试验; 接收试验不得少于 3 台, 推荐样机数量为每批设备的 10%。

###### (3) 试验类型的选择

① 老设备已生产多年, 未进行可靠性设计, 需要继续生产, 可选择可靠性测定试验, 测出设备的 MTBF (Mean Time Between Failure) 验证值, 同时根据暴露的问题采取措施, 提高设备的可靠性。

② 新设备处于设计试制阶段, 可通过可靠性试验暴露设备中的薄弱环节, 以便采取改进措施, 提高设备的固有可靠性, 可选择可靠性增长试验。

③ 新设备设计定型、生产定型和设备创优, 可选择可靠性鉴定试验, 一般情况下选用定时截尾或定数截尾试验方案, 以对设备的 MTBF 真值做出估计。

④ 根据供需双方签订的合同规定, 需要对设备的 MTBF 真值作验证的, 可选择可靠性验收

试验, 采用定时截尾或定数截尾试验方案。若供需双方签订的合同规定, 只要通过了系统试验方案就可交货, 不需对设备的 MTBF 真值做出估计, 可选用概率比序试验方案, 这种情况特别适用单台大型电子设备。

(4) 统计试验方案的参数确定。

①  $\theta_0$  (可接收的 MTBF 值) 的确定。 $\theta_0$  应小于等于  $\theta'$  ( $\theta'$  是按照电子设备所处的环境条件和应力, 用可靠性预计方法确定的 MTBF 值)。 $\theta_0$  确定之后, 根据选择的鉴别比  $D_m$  ( $D_m = \theta_0/\theta_1$ ), 就可以计算出  $\theta_1$  ( $\theta_1$  指最低可接受的 MTBF 值)。

② 生产方风险率  $\alpha$ 、使用方风险率  $\beta$  的选择。一般情况下, 供需双方可按合同执行。如果合同无规定, 或是生产厂家自行验证, 一般情况下,  $\alpha$ 、 $\beta$  可选择 0.2~0.3, 高风险  $\alpha$ 、 $\beta$  可选择 0.3~0.4。

③ 试验时间  $t$  的选择。除与  $\alpha$ 、 $\beta$  有关外, 主要取决于电子设备属于何种类型, 该设备能否长时间进行可靠性试验, 试验费用的多少。

(5) 试验数据分析

可靠性试验的数据分析的基础就是设备寿命分布函数及参量之间的关系。例如故障与应力 (电、热、振动、温度等) 的对应关系; 故障与设备早期性能变化的规律等, 这些包含有两个变量的数据, 在分析时就可利用相关及回归分析方法, 或用最小二乘法, 从试验中取得的数据, 可以制成各种图, 如直方图、拆线图, 拟合合成直线、曲线用以确定设备故障 (寿命) 的数学模型, 由模型就可写出其可靠性指标, 最后推算出该设备的可靠性参数值。

电子设备的故障模式 (寿命分布) 可以用指数分布的数学模型来描述, 通过试验, 只要取得 MTBF 的估计值 (观测值), 就可算出失效率  $\lambda$  及可靠度  $R(t)$  来; 然后与设计过程中的预计值相比较, 达到指标要求, 试验停止, 否则继续试验。

(6) 试验数据处理

可靠性试验的数据是一些实际的、多因素的信息集合。对于电子设备来说, 试验的目的不同, 所需采集的数据种类就不同, 因此要用试验的观测值来估计设备的可靠性特征值, 这是电子设备可靠性试验数据处理的关键。我们知道 MTBF 是衡量电子设备可靠性的一个重要指标, 并且检验下限应等于电子设备最低可接受的 MTBF。利用点估计的方法可以大致估算出电子设备的 MTBF。

(7) 确定测试周期和失效判据

测试周期必须合理选择, 周期太密, 会增加工作量, 周期太疏又会失掉有用的信息。测试时间可确定 1 天测 1 次, 及时发现设备失效并做好记录。

凡是在试验过程中不满足电子设备技术性能的任何一项指标, 都应作为失效判据; 此判据必须由可靠性工程师负责, 召集设计、工艺、检验等方面技术人员讨论, 统一思想, 最后制定。

## 2. 可靠性筛选试验

(1) 电子元器件的检验和筛选

前面已经介绍了电子元器件的失效率概念。我们知道, 电子元器件的早期失效是十分有害的, 但又是不可避免的。因此, 怎样剔除早期失效的元器件, 使它们在装配焊接时就已经进入失效率很低的正常使用阶段, 从而保证整机的可靠性, 这一直是设备生产中的重大研究课题。

每一台电子整机设备都要用到很多元器件, 在装配焊接之前把元器件全部逐一检验筛选, 事实上也是困难的。所以, 整机生产厂家在对元器件进行使用筛选时, 通常是根据设备的使用环境要求和元器件在电路中的工作条件及其作用, 按照国家标准和企业标准, 分别选择确定某种元器件的筛选手段。在考虑设备的使用环境要求时, 一般要区别该设备是否军工设备、是否精密设备、使用环

境是否恶劣、设备损坏是否可能带来灾害性后果等情况；在考虑元器件在电路中的工作条件及作用时，一般要分析该元器件是否为关键元器件、功率负荷是否较大、局部环境是否良好等因素，特别要认真研究元器件生产厂家提供的可靠性数据和质量认证报告。对那些要求不是很高的电子设备，一般采用随机抽样的方法检验筛选元器件；而对那些要求较高、工作环境严酷的设备，则必须采用更加严格的老化筛选方法来逐个检验元器件。

需要特别注意的是，采用随机抽样的方法对元器件进行检验筛选，并不意味着检验筛选是有可无的——凡是科学管理的企业，即使是对于通过固定渠道进货、经过质量认证的元器件，也都要长年、定期进行例行检验（例行试验）。例行试验的目的，不仅在于验证供应商提供的质量数据，还要判断元器件是否符合具体电路的特殊要求。所以，例行试验的抽样比例、样本数量及其检验筛选的操作程序，都是非常严格的。

国际上为了减少检验工作，降低成本，对用量大、价格低的元器件采用抽样检验的方法来代替百分之百的检验，其效果往往比百分之百地进行粗略检验更好。作为验收标准，用户可以提出要检验的项目并规定“可接受的质量水平”（Acceptable Quality Level），简称 AQL 值。

AQL 值是一个百分数，它或定义为每百个被检验品中可容许的废品数，或定义为每百个被检验品中可容许存在的各种缺陷数。一个废品可能包含两个或两个以上的缺陷，因此，对同一批检验品来说，后一个数必然大于或等于前一个数。这两个数愈高，则表示被抽检的这批设备质量愈差。AQL 值是它们的上限。AQL $\leq 10$  时，上述两个定义都能采用；AQL $> 10$  时，只能采用后一种定义。例如，对一般电阻器来说，国际市场上一般采用的 AQL 值为 4~6.5。

#### ① 筛选项目的分类。

##### a. 按复杂程度分。

a) 分布截尾筛选：筛选掉参数偏离标称值过大的设备。

b) 应力强度筛选：对设备施加一定强度的应力后进行测试、挑选。

c) 老炼筛选：在规定时间内对设备施加各种应力条件后进行测试、挑选。

d) 线性鉴别筛选：类似于老炼筛选，但要运用数理统计技术进行判别。

e) 精密筛选：在接近设备的使用条件下进行长期老炼，并多次精确测定其参数变化量，从中进行挑选和预测。

前两种方法简单易行，但对剔除早期失效元器件的效果较差。后几种方法需要专门的设备和较长时间，费用较高，效果也较好。目前主要是采用老炼筛选法。至于精密筛选法，由于费用高、周期长，多用于可靠性要求特别高的元器件筛选，如航天用电子装置和海底电缆通信用的元器件。

##### b. 按照施加应力检查手段分。

a) 寿命筛选：高温老炼、功率老炼等。

b) 环境应力筛选：振动、冲击、离心、温度循环等。

c) 密封性筛选：各种粗、细检漏。

d) 检查性筛选：镜检、X 光照相、红外、超声等。

#### ② 外观质量检验。在电子整机设备的生产厂家中，对元器件外观质量检验的一般标准是：

a. 元器件封装、外形尺寸、电极引线的位置和直径应该符合设备标准外形图的规定。

b. 外观应该完好无损，其表面无凹陷、划痕、裂口、污垢和锈斑；外部涂层不能有起泡、脱落和擦伤现象。

c. 电极引出线应该镀层光洁，无压折或扭曲，没有影响焊接的氧化层、污垢和伤痕。

d. 各种型号、规格标志应该完整、清晰、牢固；特别是元器件参数的分档标志、极性符号和集成电路的种类型号，其标志、字符不能模糊不清或脱落。

e. 对于电位器、可变电容或可调电感等元器件，在其调节范围内应该活动平顺、灵活，松紧适当，无机械杂音；开关类元件应该保证接触良好，动作迅速。

各种元器件用在不同的电子设备中，都有自身的特点和要求，除上述共同点以外，往往还有特殊要求，应根据具体的应用条件区别对待。

③ 电气性能使用筛选。电子整机中使用的元器件，一般需要在长时间连续通电的情况下工作，并且要受到环境条件和其他因素的影响，因此要求它们必须具有良好的可靠性和稳定性。要使电子整机稳定可靠地工作，并能经受环境和其他一些不可预见的不利条件的考验，对元器件进行必要的筛选老化，是非常重要的一个环节。

老化筛选的原理及作用是：给电子元器件施加热的、电的、机械的或者多种组合的外部应力，模拟恶劣的工作环境，使它们内部的潜在故障加速暴露出来，然后进行电气参数测量，筛选剔除那些失效或参数改变了的元器件，尽可能把早期失效消灭在正常使用之前。

筛选的指导思想是：经过老化筛选，有缺陷的元器件会失效，而优质品能够通过。这里必须注意实验方法正确和外加应力适当，否则，可能对参加筛选的元器件造成不必要的损伤。

在电子整机设备生产厂家里，广泛使用的老化筛选项目有高温存储老化、高低温循环老化、高低温冲击老化和高温功率老化等，其中高温功率老化是目前使用最多的试验项目。高温功率老化是给元器件通电，模拟它们在实际电路中的工作条件，再加上  $80\sim 180^{\circ}\text{C}$  之间的高温进行几小时至几十小时的老化，这是一种对元器件的多种潜在故障都有筛选作用的有效方法。

老化筛选需要专门的设备，投入的人力、工时、能源成本也很高。随着生产水平的进步，电子元器件的质量已经明显提高，并且电子元器件生产企业普遍开展在权威机构监督下的质量认证，一般都能够向用户提供准确的技术资料和质量保证书，这无疑可以减少整机厂对筛选元器件的投入。所以，目前除了军工、航天电子设备等可靠性要求极高的企业还对元器件进行 100% 的严格筛选以外，一般都只对元器件进行抽样检验，并且根据抽样检验的结果决定该种、该批的元器件是否能够投入生产；如果抽样检验不合格，则应该向供货方退货。

④ 温度循环筛选。温度循环筛选对部组件来说是一种很有效的应力筛选。这种筛选能暴露工艺过程中引进的缺陷及在元器件筛选中漏掉的那些元器件所固有的缺陷。主要包括组装缺陷、破裂、绝缘裂口、焊接缺陷以及容差漂移等。温度循环应考虑的主要参数为：

a. 最高温度。部组件所受的最高温度不得超过构成部组件的任何元器件或材料的最高额定温度的最低值，并考虑设备技术条件规定的最高温度值。

b. 最低温度。部组件所受的最低温度不得低于构成部组件的元器件或材料的最低额定温度的最高值，并考虑技术指标中的环境条件。

需强调的是：为了保证获得最好的筛选效果，应慎重选择最高与最低温度。超过最高额定值可能会导致损伤无缺陷的元器件或材料，这就违背了筛选原则。如果不便于用分析方法确定通电筛选时的工作温度，应当对筛选的设备进行热测量，以便确定最高和最低筛选温度。

c. 温度变化率。温度变化率与筛选效果有关，最大变化率取决于热箱特性和被筛选元器件的承受能力。

d. 循环次数。GJB1032 中规定，温度循环时间为  $80\sim 160\text{h}$ ， $20\sim 40$  次热循环。

⑤ 振动。对部、组件进行振动筛选，应选择振动种类，如随机振动、正弦扫描等，并考虑下列参数：

a. 振动等级。美国军用标准建议采用随机振动, 振动等级为  $0.04 \sim 0.045 \text{g}^2/\text{Hz}$ 。如果组件对振动激励的动态响应特性是未知的, 则应进行振动检查, 以便确定适宜的振动谱等级。

如果由于某种原因不能进行随机振动, 最好选用正弦扫描振动。在部组件级进行单一频率的振动意义不大。

b. 振动持续时间。美军标建议对三个轴向各进行 10min 振动。

⑥ 筛选程序。由于各种电子设备和电子装置使用的元器件的类别、品种和规格繁多, 筛选条件很难全部建立, 一般制造厂都把主要精力放在半导体器件的可靠性筛选上, 特别是对集成电路的筛选。下面简要介绍几种典型的筛选程序。

a. 半导体二极管筛选程序。高温储存→高、低温循环→敲变→跌落→功率老炼→高温反偏→高温测试→低温测试→粗、细检漏→外观检查。

所谓敲变, 就是用硬橡胶锤敲打 3~5 次, 同时用图示仪监视正向特性曲线。跌落是使元件在 80cm 高度, 自由跌落在玻璃板上 5~15 次。这两种方法实际上是简易的冲击振动筛选。外观检查时要用显微镜或放大镜来检查外壳的缺陷。

b. 三极管的筛选程序。高温储存→高低温循环→跌落(大功率管不做)→功率老炼→高、低温测试(有要求时做)→常温测试→粗、细检漏→外观检查。

c. 集成电路筛选程序。高温储存→高、低温循环→跌落→离心→高温功率老炼→高温测试→低温测试→检漏→外观检查→常温测试。

所谓离心, 就是将元器件放在离心机中, 加 20 000g 离心力, 时间为 1min。

## (2) 设备或系统级筛选

设备或系统级的筛选, 费用较大, 但它能排除制造过程所有级别上引入的缺陷。

① 暴露缺陷。设备或系统级筛选主要是暴露设备的工艺缺陷、设计缺陷及加工缺陷等。一般包括下列几个方面。

a. 连接器缺陷, 如触点松动、弯曲, 连接器破裂、插针松动等。

b. 导线缺陷, 如连接松动、绝缘受损、布线缺陷等。

c. 电缆缺陷, 如电缆加工不当、绝缘受损、设计不妥等。

d. 外购或外协组件缺陷等。

② 筛选方法。筛选应力仍然是热循环和振动两种。但在筛选中应遵照与部组件相同的过程进行筛选。不同的是设备温度筛选可能较难达到较高的温度变化率, 因此, 可保持一段极值温度。此外, 设备温度循环次数可适当少些, 一般为 4~12 个循环。

随机振动筛选方法应与部、组件应力筛选方法相同, 但时间可适当缩短。

## 2.2.2 可靠性设计措施

### 2.2.2.1 简化设计方案

从系统可靠性的角度来看, 系统愈复杂, 所用的元器件愈多, 则系统的可靠性就越低。因此, 在满足系统性能要求的前提下, 尽量简化设计方案, 减少所用元器件数目, 是提高系统可靠性的重要环节。为了合理地实现简化, 应充分注意下列原则。

① 综合利用硬件与软件的功能, 充分发挥软件的功能, 以减少硬件的数量。

② 对指标和性能的确定要合理, 避免盲目追求高性能和高指标。

③ 积极、慎重地采用新技术、新器件。

④ 尽量采用经过优化设计和实际考验的标准电路单元。

⑤ 尽可能采用集成度较高的集成电路。

⑥ 对数字逻辑电路要进行简化设计。

⑦ 尽可能采用数字电路来代替线性电路。

⑧ 多用优选的和标准的元器件，少用可调元件。

⑨ 采用自动检测与保护电路。为便于排除故障与维修，在设计时可考虑适当的监测点，以利查找与修复。

### 2.2.2.2 正确选用电子元器件

#### 1. 选用电子元器件的原则

前面讲到，元器件的可靠性是设备可靠性的基础。电子设备的硬件故障大都直接以元器件的各种损坏或故障的方式表现出来。但仔细分析原因，并不一定都是元器件本身的缺陷造成的，而有相当一部分是设计人员对元器件选用不当所致。

##### (1) 电子元器件使用中常见的问题

① 所加应力超过设备的额定值。

② 将元器件用于不适合的环境条件下，而不另加防护措施。

③ 只注意元器件性能的主要参数，诸如电阻器的电阻值和允许耗散功率，而不注意其他参数，如容许偏差、温度系数等。

④ 只考虑设备运行时的稳态条件，而忽略瞬态条件对元器件的附加应力。

⑤ 不注意同类元器件间品种、规格、型号之间的差异，没有进行优选。

##### (2) 在选用电子元器件时应充分注意下列原则

① 根据电路性能的要求和工作环境条件选用合适的元器件，使用条件不得超过元器件电参数的额定值和相应的环境条件，并留有足够的裕量。

元器件的使用条件包括工作环境条件和负荷条件。工作条件不同，元器件的失效率变化很大，有时可相差几百倍。一般来说，所处的环境条件越恶劣，其失效率就越大。因此，元器件一般都是降额使用。降额使用就是让元器件在低于其额定值的应力条件下工作。合理的降额可以大幅度地降低元器件的失效率。因此，降额使用已成为提高电子设备可靠性最有效的措施之一。

轻负荷工作可使元器件失效率降低，可靠性提高。实验表明：把电容器的电压及电阻器的功率降低 1/5，就可使可靠性提高 2~20 倍。根据经验，电容器应在额定电压 50% 以下使用；电阻器应在额定功率的 25% 以下使用。半导体管可用额定功率的 10%~30%；锗管的平均电流为额定值的 1/3，平均功耗约为额定值的 1/3~1/6。但并不是说减荷越多越好，若不是恰到好处，反而有可能降低可靠性。如继电器减荷则吸引力小，氧化膜磨不掉，使可靠性下降。所以，减荷使用要依具体的元器件区别对待。

② 尽可能压缩元器件的品种和规格数，提高它们的复用率。

③ 除特殊情况外，所有电子元器件都应按不同要求经过必要的可靠性筛选后，才能用到设备中去。

④ 仔细分析比较同类元器件在品种、规格、型号和制造厂商之间的差异，择优选用，并注意统计、积累在使用和验收过程中元器件所表现出来的性能与可靠性方面的数据，作为以后选用的重要依据。

⑤ 电子设备的工作状态发生变化时，其中的某些电路中就不可避免地会出现瞬态过程，这

种瞬态过程可能产生不应有的电压脉冲或电流脉冲,这些脉冲本身的幅值或经电路放大后的幅值,可能要比正常信号高出几倍甚至几十倍,形成所谓浪涌。常见的工作状态突变包括:系统接入电网、电流通断、继电器通断等。它所造成的浪涌往往会对相关的电子元器件造成瞬态过应力,这是大量元器件损坏的主要原因之一。为此,应采取各种措施防止瞬间过应力的损坏。

2. 电阻器的正确选用与质量判别

(1) 电阻器的正确选用

在选用电阻时,不仅要求其各项参数符合电路的使用条件,还要考虑外形尺寸和价格等多方面的因素。一般来说,电阻器应该选用标称阻值系列,允许偏差多用 $\pm 5\%$ 的,额定功率大约为在电路中的实际功耗的1.5~2倍以上。

在研制电子设备时,要仔细分析电路的具体要求。在那些稳定性、耐热性、可靠性要求比较高的电路中,应该选用金属膜或金属氧化膜电阻;如果要求功率大、耐热性能好,工作频率又不高,则可选用线绕电阻;对于无特殊要求的一般电路,可使用碳膜电阻,以便降低成本。表 2-26 对各种电阻的特性进行了比较,可以在选用时参考,表格中的 $\Delta$ 表示该品种具有的性能。

表 2-26 电阻的特性及选用

性 能	合 成 碳 膜	合成碳实心	热分解碳膜	金属氧化膜	金 属 膜	金属玻璃釉
阻值范围	中~很高	中~高	中~高	低~中	低~高	中~很高
温度系数	尚可	尚可	中	良	优	良~优
非线性、噪声	尚可	尚可	良	良~优	优	中
高频、快速响应	良	尚可	优	优	极优	良
比功率	低	中	中	中~高	中~高	高
脉冲负荷	良	优	良	优	中	良
储存稳定性	中	中	良	良	良~优	良~优
工作稳定性	中	良	良	良	优	良~优
耐潮性	中	中	良	良	良~优	良~优
可靠性		优	中	良~优	良~优	良~优
通用		$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$		
高可靠		$\Delta$		$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$
半精密			$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$
精密					$\Delta$	$\Delta$
高精密						
中功率				$\Delta$		$\Delta$
大功率				$\Delta$		
高频、快速响应			$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	
高频大功率			$\Delta$	$\Delta$		
高压、高阻	$\Delta$					$\Delta$
贴片式					$\Delta$	$\Delta$
电阻网络	$\Delta$				$\Delta$	$\Delta$

(2) 电阻器的质量判别方法

① 看电阻器表面有无烧焦、引线有无折断现象。

② 再用万用表测量阻值,合格的电阻值应该稳定在允许的误差范围内,若超出误差范围或阻值不稳定,则不能选用。



③ 根据“电阻器质量越好，其噪声电压越小”的原理，使用“电阻噪声测量仪”测量电阻噪声，判别电阻质量的优劣。

### 3. 电位器的合理选用及质量判别

#### (1) 电位器的合理选用

电位器的规格品种很多，在选用时，不仅要根据具体电路的使用条件（电阻值及功率要求）来确定，还要考虑调节、操作和成本方面的要求。下面是针对不同用途推荐电位器选用类型，参见表 2-27。

表 2-27 各类电位器性能比较

性 能	线 绕	块金属膜	合成实心	合成碳膜	金属玻璃釉	导电塑料	金属膜
阻值范围 ( $\Omega$ )	4.7~5.6k	2~5k	100~4.7M	470~4.7M	100~100M	50~100M	100~100k
线性精度 ( $\pm\%$ )	>0.1	—	—	>0.2	<10	>0.05	—
额定功率 (W)	0.5~100	0.5	0.25~2	0.25~2	0.25~2	0.5~2	—
分辨率	中~良	极优	良	优	优	极优	优
滑动噪声	—	—	中	低~中	中	低	中
零位电阻	低	低	中	中	中	中	中
耐潮性	良	良	差	差	优	差	优
耐磨寿命	良	良	优	良	优	优	良
负荷寿命	优良	优良	良	良	优良	良	优

- ① 普通电子仪器：合成碳膜或有机实心电位器。
- ② 大功率低频电路、高温情况：线绕或金属玻璃釉电位器。
- ③ 高精度：线绕、导电塑料或精密合成碳膜电位器。
- ④ 高分辨率：各类非线绕电位器或多圈式微调电位器。
- ⑤ 高频、高稳定性：薄膜电位器。
- ⑥ 调节后不需再动：轴端锁紧式电位器。
- ⑦ 多个电路同步调节：多联电位器。
- ⑧ 精密、微量调节：带慢轴调节机构的微调电位器。
- ⑨ 要求电压均匀变化：直线式电位器。
- ⑩ 音量控制电位器：指数式电位器。

#### (2) 电位器的质量判别

① 用万用表测量电位器的两个固定端的电阻，并与标称值核对阻值。如果万用表指示的阻值比标称值大得多，表明电位器已坏；如果指示的数值跳动，表明电位器内部接触不好。

② 测量滑动端与固定端的阻值变化情况。移动滑动端，如果阻值从最小到最大之间连续变化，而且最小值越小，最大值越接近标称值，说明电位器质量较好；如阻值间断或不连续，说明电位器滑动端接触不良，则不能选用。

③ 用“电位器动噪声测量仪”判别质量好坏。

#### (3) 安装使用电位器的注意事项

① 焊接前要对焊点做好镀锡处理，去除焊点上的漆皮与污垢；焊接时间要适宜，不得加热过长，避免引线周围的壳体软化变形。

② 有些电位器的端面上备有防止壳体转动的定位柱，安装时要注意检查定位柱是否正确装

入安装面板上的定位孔里，避免壳体变形；用螺钉固定的矩形微调电位器，螺钉不可压得过紧，避免破坏电位器的内部结构。

③ 安装在电位器轴端的旋钮不要过大，应与电位器的尺寸相匹配。

④ 对插针式引线的电位器，为防止引线折断，不得用力弯曲或扭动引线。

#### 4. 电容器的合理选用

电容器的种类繁多，性能指标各异，合理选用电容器对于设备设计十分重要。所谓合理选用，就是要在满足电路要求的前提下综合考虑体积、重量、成本、可靠性等各方面的因素。为了合理选用电容器，应该及时掌握市场信息，熟悉各类电容器的性能特点；了解电路的使用条件和要求以及每个电容器在电路中的作用，如耐压、频率、容量、允许偏差、介质损耗、工作环境、体积、价格等因素。

一般，电路各级之间耦合多选用涤纶电容器；电源滤波和低频旁路宜选用铝电解电容器；高频电路和要求电容量稳定的地方应该用高频瓷介电容器、云母电容器或钽电解电容器；如果在使用中要求电容量作经常性调整，可选用可变电容器；如不需要经常调整，可使用微调电容器。

在具体选用电容器时，还应该注意如下问题。

##### (1) 电容器的额定电压

不同类型的电容器有不同的额定电压系列，所选电容器的耐压应该符合标准系列，一般应该高于电容器两端实际电压的 1.5~2 倍。不论选用何种电容器，都不得使其额定电压低于电路实际工作电压的峰值，否则电容器将会被击穿。因此，必须仔细分析电容器所加电压的性质。一般，电路的工作电压是按照电压的有效值读数的，往往会忽略电压的峰值可能超过电容器的额定电压的情况。因此，在选择电容器的额定电压时，必须留有充分的裕量。

但是，选用电容器的耐压也不是越高越好，耐压高的电容器体积大、价格高。不仅如此，由于液体电解质的电解电容器自身结构的特点，一般应使电路的实际电压相当于所选额定电压的 50%~70%，才能充分发挥电解电容器的作用。如果实际工作电压低于其额定电压的一半，让高耐压的电解电容器在低电压的电路中长期工作，反而容易使它的电容量逐渐减小、损耗增大，导致工作状态变差。

##### (2) 标称容量及精度等级

各类电容器均有其容量标称值系列及精度等级。电容器在电路中的作用各不相同，某些特殊场合（如定时电路）要求一定的容量精度，而在更多场合，容量偏差可以很大，例如，在电路中用于耦合或旁路，电容量相差几倍往往都没有很大关系。在制造电容器时，控制容量比较困难，不同精度的电容器，价格相差很大。所以，在确定电容器的容量精度时，应该仔细考虑电路的要求，不要盲目追求电容器的精度等级。

##### (3) 对 $\tan\delta$ 值的选择

介质材料的区别使电容器的  $\tan\delta$  值相差很大。在高频电路或对信号相位要求严格的电路中， $\tan\delta$  值对电路性能的影响很大，直接关系到整机的技术指标，所以应该选择  $\tan\delta$  值较小的电容器。

##### (4) 电容器的体积和比率电容

在设备设计中，一般都希望体积小、重量轻，特别是在密度较高的电路中，更要求选用小型电容器。由于介质材料不同，电容器的体积往往相差几倍或几十倍。

单位体积的电容量称为电容器的比率电容。比率电容越大，电容器的体积越小，价格也越贵一些。

##### (5) 温度

一般电容器的使用温度应低于 50℃，尤其是电解电容器不宜在高温下工作，但过低的环境温度也会使有些电容器的封装材料及介质受到破坏，对于电解电容器来说，低于 -45℃ 时则采用耐寒型的。

##### (6) 成本

由于各类电容器的生产工艺相差很大,因此价格也相差很大。在满足设备技术要求的情况下,应该尽量选用价格低廉的电容器,以便降低设备成本。

表 2-28 中列出了常见固定电容器的性能特点及适用范围,供选用时参考。

表 2-28 常见固定电容器的性能特点及适用范围

用 途	电容器种类	电 容 量	工作电压 (V)	损耗角正切 ( $\tan\delta$ )
高频旁路	高频陶瓷	8.2~1000pF	500	0.0015
	云母	51~4700pF	500	0.001
	玻璃膜	100~3300pF	500	0.0012
	涤纶	100~3300pF	400	0.015
	玻璃釉	10~3300pF	100	0.001
低频旁路	低频陶瓷	0.001~0.047 $\mu$ F	<500	0.04
	铝电解	10~1000 $\mu$ F	25~450	0.2
	涤纶	0.001~0.047 $\mu$ F	400	0.015
滤波	铝电解	10~10000 $\mu$ F	25~450	<0.2
	复合纸介	0.01~10 $\mu$ F	2000	0.015
	液体钽电解	220~3300 $\mu$ F	16~125	<0.5
滤波器	陶瓷	100~4700pF	500	0.0015
	聚苯乙烯	100~4700pF	500	0.0015
	云母	51~4700pF		
调谐	高频陶瓷	1~1000pF	500	0.0015
	云母	51~1000pF	500	0.0015
	玻璃膜	51~1000pF	500	0.0012
	聚苯乙烯	51~1000pF	<1600	0.001
高频耦合	云母	470~6800pF	500	0.001
	聚苯乙烯	470~6800pF	400	0.001
	高频陶瓷	10~6800pF	500	0.0015
低频耦合	铝电解	1~47 $\mu$ F	<450	0.15
	低频陶瓷	0.001~0.047 $\mu$ F	<500	0.04
	涤纶	0.001~0.1 $\mu$ F	<400	<0.015
	液体钽电解	0.33~470 $\mu$ F	<63	<0.15
电源输入端抗高频干扰	低频陶瓷	0.001~0.047 $\mu$ F	<500	0.04
	云母	0.001~0.047 $\mu$ F	500	0.001
	涤纶	0.001~0.1 $\mu$ F	<1000	<0.015
储能	复合纸介	10~50 $\mu$ F	1k~30k	0.015
	铝电解	100~10000 $\mu$ F	1k~5k	0.15
开关电源	铝电解	1000~10000 $\mu$ F	25~100	>0.3
高频、高压	高频陶瓷	470~6800pF	<12k	0.001
	聚苯乙烯	180~4000pF	<30k	0.001
	云母	330~2000pF	<10k	0.001
一般电路中的小型电容器	金属化纸介	0.001~10 $\mu$ F	<160	<0.01
	高频陶瓷	1~500pF	<160	0.0015
	低频陶瓷	680~0.047 $\mu$ F	63	<0.04
	云母	4.7~10000pF	100	<0.001

续表

用 途	电容器种类	电 容 量	工作电压 (V)	损耗角正切 ( $\tan\delta$ )
一般电路中的小型电容器	铝电解	1~3300 $\mu$ F	6.3~50	<0.2
	钽电解	1~3300 $\mu$ F	6.3~63	<0.15
	聚苯乙烯	0.47p~0.47 $\mu$ F	50~100	<0.001
	玻璃釉	10~3300pF	<63	0.0015
	金属化涤纶	0.1~1 $\mu$ F	63	0.0015
	聚丙烯	0.01~0.47 $\mu$ F	63~160	0.001

5. 继电器的选用

(1) 先了解必要的条件。控制电路的电源电压，能提供的最大电流；被控制电路中的电压和电流；被控电路需要几组、什么形式的触点。选用继电器时，一般控制电路的电源电压可作为选用的依据。控制电路应能给继电器提供足够的工作电流，否则继电器吸合是不稳定的。

(2) 查阅有关资料。确定使用条件后，可查找相关资料，找出需要的继电器的型号和规格号。若手头已有继电器，可依据资料核对是否可以利用，最后考虑尺寸是否合适。

(3) 注意器具的容积。若是用于一般用电器，除考虑机箱容积外，小型继电器主要考虑电路板安装布局。对于小型电器，如玩具、遥控装置则应选用超小型继电器设备。

6. 二极管的选用

(1) 切勿使电压、电流超过器件手册中规定的极限值，并应根据设计原则选取一定的裕量。

(2) 允许使用小功率电烙铁进行焊接，焊接时间应该小于 3~5s，在焊触点接触型二极管时，要注意保证焊点与管芯之间有良好的散热。

(3) 玻璃封装的二极管引线的弯曲处距离管体不能太短，一般要 $\geq 2\text{mm}$ 。

(4) 安装二极管的位置尽可能不要靠近电路中的发热元件。

(5) 接入电路时要注意二极管的极性。

7. 三极管的选用

使用三极管的注意事项与二极管基本相同，此外还有如下几点。

(1) 安装时要分清不同电极的管脚位置，焊点距离管壳不要太近，一般三极管应该距离印制板 2~3mm 以上。

(2) 大功率管的散热器与管壳的接触面应该平整光滑，中间应该涂抹导热硅脂以便减小热阻并减少腐蚀；要保证固定三极管的螺钉松紧一致。

(3) 对于大功率管，特别是外延型高频功率管，在使用中要防止二次击穿。所谓二次击穿是指这样一种现象：三极管在工作时，可能  $V_{ce}$  并未超过  $BV_{ceo}$ ， $P_c$  也未达到  $P_{cm}$ ，而三极管已被击穿损坏了。为了防止二次击穿，就必须大大降低三极管的使用功率和工作电压。其安全工作区的判定，应该依据厂家提供的资料，或在使用前进行必要的检测筛选。

应当注意，大功率管的功耗能力并不服从等功耗规律，而是随着工作电压的升高，其耗散功率相应减小。对于相同功率的三极管而言，低电压、大电流的工作条件要比在高电压、小电流下使用更为安全。

8. 场效应管的选用

结型场效应管和一般晶体三极管的使用注意事项相仿。对于绝缘栅型场效应管，应该特别注意避免栅极悬空，即栅、源两极之间必须经常保持直流通路。因为它的输入阻抗非常高，所以栅极上的感应电荷就很难通过输入电阻泄放，电荷的积累使静电电压升高，尤其是在极间电容较小

的情况下,少量电荷就会产生很高的电压,以至往往管子还未经使用,就已被击穿或出现性能下降的现象。

为了避免上述原因对绝缘栅型场效应管造成损坏,在存储时应把它的三个电极短路;在采用绝缘栅型场效应管的电路中,通常是在它的栅、源两极之间接入一个电阻或稳压二极管,使积累电荷不致过多或使电压不致超过某一界限;焊接、测试时应该采取防静电措施,电烙铁和仪器等都要有良好的接地线;使用绝缘栅型场效应管的电路和整机,外壳必须良好接地。

### 9. 集成电路的选用

(1) 在使用集成电路时,其负荷不允许超过极限值;当电源电压变化不超出额定值 $\pm 10\%$ 的范围时,集成电路的电气参数应符合规定标准;在接通或断开电源的瞬间,不得有高压产生,否则将会击穿集成电路。

(2) 输入信号的电平不得超出集成电路电源电压的范围(指输入信号的上限不得高于电源电压的上限,输入信号的下限不得低于电源电压的下限;对于单个正电源供电的集成电路,输入电平不得为负值)。必要时,应在集成电路的输入端增加输入信号电平转换电路。

(3) 一般情况下,数字集成电路的多余输入端不允许悬空,否则容易造成逻辑错误。“与门”、“与非门”的多余输入端应该接电源正端,“或门”、“或非门”的多余输入端应该接地(或电源负端)。为避免多余端,也可以把几个输入端并联起来,不过这样会增大前级电路的驱动电流,影响前级的负载能力。

(4) 数字集成电路的负载能力一般用扇出系数表示。当负载是继电器或发光二极管等需要大电流的元器件时,应该在集成电路的输出端增加驱动电路。

(5) 使用模拟集成电路前,要仔细查阅它的技术说明书和典型应用电路,特别注意外围元件的配置,保证工作电路符合规范。对线性放大集成电路,要注意调整零点漂移、防止信号堵塞、消除自激振荡。

(6) 商业级集成电路的使用温度一般在 $0\sim 70^{\circ}\text{C}$ 之间。在系统布局时,应使集成电路尽量远离热源。

(7) 在手工焊接电子设备时,一般应该最后装配焊接集成电路;不要使用大于 $45\text{W}$ 的电烙铁,每次焊接时间不得超过 $10\text{s}$ 。

(8) 对于MOS集成电路,要特别防止栅极静电感应击穿。一切测试仪器(特别是信号发生器和交流测量仪器)、电烙铁以及线路本身,均须良好接地。当MOS电路的D-S电压加载时,若G输入端悬空,很容易因静电感应造成击穿,损坏集成电路。对于使用机械开关转换输入状态的电路,为避免输入端在拨动开关的瞬间悬空,应该在输入端接一个几十千欧的电阻到电源正极(或负极)上。此外,在存储MOS集成电路时,必须将其收藏在防静电盒内或用金属箔包装起来,防止外界电场将栅极击穿。

### 10. 电声元件的选用

(1) 电声元件应该远离热源,这是因为电动式电声元件内大多有磁性材料,如果长期受热,磁铁就会退磁,动圈与音膜的连接就会损坏;压电陶瓷式、驻极体式电声元件会因为受热而改变性能。

(2) 电声元件的振动膜是发声、传声的核心部件,但共振腔是它产生音频谐振的条件之一。假如共振腔对振动膜起阻尼作用,就会极大降低振动膜的电-声转换灵敏度。例如,扬声器应该安装在木箱或机壳内才能扩展音量、改善音质;外壳还可以保护电声元件的结构部件。

(3) 电声元件应该避免潮湿的环境,纸盆式扬声器的纸盆会受潮变形,电容式传声器会因

为潮湿降低电容的品质。

(4) 应该避免电声元件的撞击和振动,防止磁体失去磁性、结构变形而损坏。

(5) 扬声器的长期输入功率不得超过其额定功率。

#### 11. 正确选用机电元件

能否正确地选用开关及接插件,对于电子设备可靠性的影响极大,下面是必须考虑的有关问题。

(1) 应该严格按照使用和维护所需要的电气、机械、环境要求来选择机电元件,不能迁就,否则容易发生故障。例如,在大电流工作的场合,选用接插件的额定电流必须比实际工作电流大很多,否则,电流过载将会引起触点的温度升高,导致弹性元件失去弹性,或者开关的塑料结构熔化变形,使开关的寿命大大降低;在高电压下,要特别注意绝缘材料和触点间隙的耐压程度;插拔次数多的接插件或开关频度高的开关,应注意其触点镀层的耐磨情况和弹性元件的屈服限度。

(2) 为了保证连通,一般应该把多余的接触点并联使用,并联的接触点数目越多,可靠性就越高。设计接触对时,应该尽可能增加并联的点数,保证可靠接触。

(3) 要特别注意接触面的清洁。经验证明,接触点表面肮脏是机电元件的主要故障之一。在购买或领用新的开关及接插件后,应该保持清洁并且尽可能减少不必要的插拔或拨动,避免触点磨损;在装配焊接时,应该注意焊锡、焊剂或油污不要流到接触表面上;如果可能,应该定期清洗或修磨开关及接插件的接触对。

(4) 在焊接开关和接插件的连线时,应避免加热时间过长、焊锡和焊剂使用过多,否则可能使塑料结构或接触点损伤变形,引起接触不良。

(5) 接插件和开关的接线端要防止虚焊或连接不良,为避免接线端上的导线从根部折断,在焊接后应加装塑料热缩套管。

(6) 要注意开关及接插件在高频环境中的工作情况。当工作频率超过 100kHz 时,小型接插件或开关的各个触点上,往往同时分别有高、低电平的信号或快速脉冲信号通过,应该特别注意避免信号的相互串扰,必要时可以在接触对之间加接地线,起到屏蔽作用。高频同轴电缆与接插件连接时,电缆的屏蔽层要均匀梳平,内外导体焊接后都要修光,焊点不宜过大,不允许残留可能引起放电的毛刺。

(7) 当信号电流小于几微安时,由于开关内的接触点表面有氧化膜或污染层,假如接触电压不足以击穿膜层,将会呈现很大的接触电阻,所以应该选用密封型或压力较大的滑动接触式开关。

(8) 多数接插件一般都设有定位装置以免插错方向,插接时应该特别注意;对于没有定位装置的接插件,更应该在安装时做好永久性的接插标志,避免使用者误操作。

(9) 插拔力大的连接器,安装一定要牢固。对于这样的连接器,要保证机械安装强度足够高,避免在插拔过程中因用力使安装底板变形而影响接触的可靠性。

(10) 电路通过电缆和接插件连通以后,不要为追求美观而绷紧电缆,应该保留一定的长度裕量,防止电缆在振动时受力拉断;选用没有锁定装置的多线连接器(如微型计算机系统总线插座),应在确定整机的机械结构时采取锁定措施,避免在运输、搬动过程中由于振动冲击引起接触面磨损或脱落。

#### 2.2.2.3 电子设备整机防护

对电子设备采取各种防护措施,就是为了减少气候、机械和电磁等因素对电子设备的影响,从而提高设备的可靠性。这是结构设计中必不可少的重要组成部分。

### 1. 低气压环境中设备的防护

所谓气压的影响，主要是指低气压对电子设备的影响。随着高度的增加，气压降低，空气也变得稀薄，空气绝缘强度下降，灭弧困难。低气压的防护措施有：

- (1) 灌封高耐压的绝缘材料，把空气完全排走而不受气压变化的影响。常用的材料有硅橡胶。
- (2) 采用密封结构把设备完全密封起来，可以从根本上解决低气压对设备的影响。

### 2. 潜入深水设备的防护

水下和某些海用设备，在深入水下或经常受到海水冲击时，设备就可能进水。由于水中存在着各种离子，会引起短路和击穿。因此，对于使用在这些特殊环境下的电子设备必须采取相应的防护措施如下：

- (1) 对于潜入深水的设备，将设备装入耐高压的容器内，并采用可靠性高的密封结构。
- (2) 对密封设备的外表面，涂覆耐水性好的防锈漆和防污漆，使之不受海生动物和植物的侵蚀。

### 3. 机械振动、冲击条件下设备的防护

对电子设备机械因素影响的防护，可从以下方面考虑：提高电子设备的耐振动、冲击能力，如设备在运输过程中常采用瓦楞纸、聚乙烯气垫薄膜等材料进行包装维护；提高结构的刚度和强度，如加固结构的底座、采用加强筋、配对螺栓连接等方法；对设备内的零、部件必须严格按工艺要求进行安装，以加强设备的耐振动、冲击能力；对一些要求较高的或工作在恶劣环境的电子设备可安装减振器，以保证设备和电子元器件、机械零部件在外界机械条件作用下不致损坏和失效。

## 第3章 电子设备热设计

电子设备的热防护设计，就是根据传热学的基本原理，采取各种散热措施，使芯片级、元件级、组件级和系统级设备的工作温度不超过其极限温度，从而保证电子设备在预定的热环境下稳定可靠地工作。

### 3.1 电子设备热设计基础

#### 3.1.1 电子设备热环境和散热途径

##### 3.1.1.1 电子设备的热环境

###### 1. 外部热环境

各类电子设备使用场所的热环境的可变性是热设计必须考虑的一个重要因素。电子设备的热环境包括：

- (1) 环境温度和压力（或高度）的极限值。
- (2) 环境温度和压力（或高度）的变化率。
- (3) 太阳或周围物体的辐射热。

(4) 可利用的热沉（包括种类、温度、压力和湿度）。所谓热沉，是指一个无限大的热容器，它的温度不随传递到它的热能大小而变化，它可能是大地、大气、大体积的水或宇宙，又称热地。对空用和陆用设备而言，周围的大气就是热沉。

(5) 冷却剂的种类、温度、压力和允许的压降（对由其他系统或设备提供冷却剂进行冷却的设备而言）。

###### 2. 内部热环境

电子设备工作时，输出功率往往只占设备输入功率的一部分，其功率损失一般都以热能形式散发出来。实际上电子设备内部任何具有实际电阻的载流元器件都是一个热源，如变压器、大功率晶体管、电阻等。另外，电子设备的温度与周围的环境温度有密切的联系。当环境温度较高时，设备工作时所产生的热能就难以散发出去，将使设备温升提高。

研究表明，芯片级的热流密度高达  $100\text{W}/\text{cm}^2$ ，它仅比太阳表面的热流密度低两个数量级，太阳表面的温度可达  $6\,000^\circ\text{C}$ ，而半导体集成电路芯片的结温应低于  $100^\circ\text{C}$ ，如此高的热流密度，若不采取合理的热设计技术，必将严重影响电子元器件和设备的热可靠性。

(1) 温度对变压器、扼流圈的影响 温度对这两类元件的影响，除降低其使用寿命外，绝缘材料的性能也将下降。一般变压器扼流圈的允许温度应低于  $95^\circ\text{C}$ 。

(2) 温度对半导体器件的影响 半导体器件对温度反应很敏感，过高的温度会使器件的工作点发生漂移、增益不稳定、噪声增大、信号失真，严重时引起热击穿。因此，通常半导体器件



的工作温度不能过高,如锗管不超过 70~100℃;硅管不超过 150~200℃。

(3) 温度对电阻器的影响 温度升高会使电阻的使用功率下降,导致其寿命降低。如 RTX 型碳膜电阻,当环境温度为 40℃ 时,允许的使用功率为标称值的 100%;环境温度增至 100℃ 时,允许使用功率仅为标称值的 20%。另外,温度过高使热噪声增大。温度变化同样会使其阻值变化,温度每升高或降低 10℃,其阻值大约变化 1%。

(4) 温度对电容器的影响 温度对电容器的影响主要是降低其使用寿命。通常认为,在超过规定允许温度下工作时,温度每升高 10℃,寿命降低一半。此外,温度的变化也会引起电容量、功率因数等参数的变化。

防止电子元器件的热失效是热设计的主要内容。热失效是指电子元器件直接由于热因素而导致完全失去其电气功能的一种失效形式。严重的失效,在某种程度上取决于电子元器件的工作过程所造成的局部温度场。因此,就需要正确地确定出现热失效的温度,而这个温度应成为热设计系统的重要判据;在确定热设计方案时,电子元器件的最高允许温度和最大功耗应作为主要的设计参数。电子设备工作时的极限温度应以元器件的最低极限温度来要求,考虑到设备的环境温度一般为 -40~+50℃,所以电子设备内部的温度一般不超过 50~80℃。

### 3.1.1.2 电子设备的散热途径

#### 1. 热传导

热量的传递是通过物体的内部或紧密接触的两物体间分子热运动所形成的碰撞来完成的,物体内部(或两物体间)温度较高处其分子运动的速度较快,所具有的动能也较高,当它们与邻近温度较低处运动速度较慢,动能也较低的分子相撞时,就会将一部分热能由温度较高处传到温度较低处,这种传热过程称为热传导或导热。热传导的热量可用下式表示:

$$Q = \Delta t / R_T \quad (3-1)$$

式中  $Q$  为单位时间内热传导的热量(W),  $1W = 0.86cal/h = 3.61J/h$ ;  $\Delta t$  为热传导时的温度差(℃);  $R_T$  为热阻(℃/W)。

热阻是热流途径上的阻力大小。它包括热流通过物体内部时的阻力  $R_s$  (称为导热热阻),和热流通过两接触面时阻力  $R_c$  (称为接触热阻),故热阻

$$R_T = \sum R_s + \sum R_c \quad (3-2)$$

$$R_s = \delta / (\lambda \cdot S) \quad (3-3)$$

$$R_c = 1 / (k_c \cdot S) \quad (3-4)$$

式中  $\delta$  为传热路径的长度(m);  $S$  为传导截面积(m<sup>2</sup>);  $\lambda$  为导热系数(W/m℃);  $k_c$  为接触传热系数(W/m<sup>2</sup>℃)。

导热系数是表示材料导热能力的物理量。不同材料有不同的导热系数。导热系数越大,说明物体导热性能越好。

利用热传导散热的主要措施如下:

(1) 选用导热系数大的材料制造导热零件,可降低热阻。如用铜或铝等材料作散热器。

(2) 扩大热传导零件间的接触面积和压力,接触面应光滑平整;也可在两接触面间涂硅脂,或垫入软金属箔,如钢片、铜箔等措施以降低接触热阻。

(3) 尽量缩短热传导路径;同时,导热路径中不应有绝热或隔热元件。

## 2. 热对流

对流换热是指流动的流体（气体或液体）与固体壁面直接接触时，由于温差引起的相互之间的热能传递过程。它既有流体分子之间的导热作用，又有流体本身的对流作用。所以对流传热是一种复杂的换热过程，它受到导热规律和流体流动规律的支配。它与流体的流动、流体的物理性质、换热面的几何形状、尺寸及位置等因素有关。

### （1）流体运动发生的原因

引起流体流动的原因可分为两种：一是由冷、热流体的密度差而引起的流动，称为自然对流；二是由外力（泵或风机）造成流体内压力的不同而引起的流动，称为强迫对流。

在自然对流中，受热区的流体，由于分子内能增加使这一部分流体的密度减小，“浮升力”将分子移向温度低的区域，从而产生对流运动。这种运动既导致流体本身的热交换，又使流体与固体之间进行热交换。

在强迫对流中，流体运动的强烈程度与外力在流体内所造成的压差、流体的种类、温差以及流道的结构形状等有关。

### （2）流体流动的状态

流体的流动主要分为层流和紊流两种状态。

① 层流。指流速低于临界速度时形成的流动。在层流中，流体分子的流线是相互平行、互不交叉的。这时，沿壁面法向的传热靠导热进行。

② 紊流。指当流速超过临界速度时，流体分子产生的不规则运动。当出现紊流时，紧贴于壁面的薄层内具有层流的性质，而在薄层之外，导热和紊流同时存在。换热的强度主要取决于薄层内热阻的大小，因为这里的温度梯度最大。

流体流动状态对换热有决定性的影响，在层流时，换热过程的热阻完全取决于层流薄层的厚度。流体从层流向紊流过渡时，由于紊流支层的旋涡作用，换热比层流要好；当达到完全紊流时，换热系数趋于某一常数，此时，换热热阻主要取决于紊流时的层流底层的厚度。

### （3）对流换热公式

$$Q = \alpha \Delta t S \quad (3-5)$$

式中  $Q$  为单位时间内对流所排出的热量（W）； $\alpha$  为散热系数（W/m<sup>2</sup>℃）； $\Delta t$  为散热物体表面与冷却介质的温度差（℃）； $S$  为散热面积（m<sup>2</sup>）。

散热系数不仅与流体介质的性质有关，而且与对流的类型、对流的速度、散热物体的形状及位置等因素有关。

### （4）利用对流散热的主要措施

① 加大温差。即降低物体周围对流介质的温度。

② 加大散热面积。采取有利于对流散热的散热器和安装位置，如将散热器制成肋片、燕尾形和叉指形等。

③ 加大对流介质的流动速度。选择有利于对流换热的流体介质，以带走更多的热量。例如，强迫对流比自然对流的速度高，水比空气的对流散热能力强等。

## 3. 热辐射

热辐射是在两物体没有接触的情况下发生的。任何物体由于原子内部电子的运动和原子之间的振动，必然会引起周围电磁场的交替变化，因此就有一部分能量（热能）要转换成为电磁能，而被交变电磁场——电磁波传播出去，当电磁波射到另一物体表面时会有一部分电磁波重新转换成热能而被这物体吸收，这种热的传递方式就称为热辐射。

对热辐射而言,温度是电子振动和被激发的基本原因,故热辐射主要取决于温度。辐射能量的大小与物体温度的四次方成正比。因辐射而放出的热量可用下式表示:

$$Q=C \cdot S[(T_2/100)^4-(T_1/100)^4] \quad (3-6)$$

式中  $Q$  为单位时间内辐射放出的热量(W);  $C$  为辐射系数( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ );  $T_2$ 、 $T_1$  为该物体及空气的绝对温度(K)。

热辐射的投射、反射和折射规律和可见光线基本相同。热辐射能射向物体后,一般总是部分地被吸收,一部分被反射,另一部分穿透物体。被吸收的那部分能量使物体温度升高,而被物体反射及透过物体的那部分能量则落到另外物体上,也同样地发生吸收、反射和穿透的过程。经过多次反射和吸收的结果,物体所辐射的能量完全分配给其周围的物体。

利用热辐射来散热的主要措施有:

(1) 在零、部件或散热片上涂覆黑色或有色粗糙的漆,以增强辐射能力。对热敏感元件的表面应做成光亮的表面,以减小吸收辐射热。

(2) 加大辐射体的表面积。

(3) 加大辐射体与周围环境的温差。

航天器上的电子设备依靠向宇宙空间的热辐射实现散热,其空间环境温度为 $-269^\circ\text{C}$ ,没有空气,是高真空的环境。航天器要经受太阳的直接热辐射,行星及其卫星的反照,以及行星与卫星阴影区的深度冷却。故在航天器表面应有合适的涂层,它既可以吸收来自太阳的辐射热,又可以为航天器及电子设备提供极好的冷却。

### 3.1.2 电子设备热设计原则和步骤

#### 3.1.2.1 热设计的基本要求

由于温度与元器件失效率的指数规律,随温度的升高,失效律迅速增加,因此,在进行热设计时,必须首先了解元器件的热特性,并根据 GJB/Z299《电子设备可靠性预计手册》提供的元器件基本失效率与温度  $T$ 、电应力比  $S$  的关系模型,进行可靠性预计,此时要求预先分析元器件的工作环境温度 and 电应力比  $S$ 、以便利用“ $T-S$ ”表或曲线图查得值。在此基础上,可以根据设备工作环境的类别和元器件质量等级等,预计元器件的工作失效率以及设备的可靠性。

(1) 热设计应满足设备可靠性的要求。高温对大多数电子元器件将产生严重的影响。过应力(电、热或机械应力)容易使元器件过早失效,电应力与热应力之间有着紧密的内在联系,减少电应力(降额)可使热应力得到相应的降低,可以提高其可靠性。在进行热设计系统设计时,应把元器件的温度控制在规定的数值以下。

(2) 热设计应满足设备预期工作的热环境要求。地面用电子设备的热环境包括:设备周围的空气温度、湿度、气压和空气流速,设备周围物体的形状和黑度,日光照射等。

机载电子设备的热环境包括:飞行高度、飞行速度、设备在飞机上的安装位置、有无空调舱、空调空气的温度和速度等。

(3) 热设计应满足对冷却系统的限制要求。对冷却系统的限制主要包括对使用的电源(交流或直流及功率)的限制、对振动和噪声的限制、对冷却剂进出口温度的限制及结构(安装条件、密封、体积和重量等)的限制。

(4) 电子设备热设计应与电路设计及结构设计同时进行。

(5) 热设计与维修性设计相结合。

(6) 根据发热功耗, 环境温度、允许工作温度、可靠性要求, 以及尺寸、重量、冷却所需功率、经济性与安全等因素, 选择最简单、最有效的冷却方法。

(7) 热控制设计应保证电子设备在紧急情况下, 具有最起码的冷却措施, 使关键部件或设备在冷却系统某些部件遭破坏或不工作的情况下, 具有继续工作的能力。

### 3.1.2.2 热设计的基本原则

电子设备热设计的基本任务是在热源至热沉之间提供一条低热阻通道, 保证热量迅速传递出去, 以便满足可靠性的要求。

(1) 保证热设计系统具有良好的冷却功能, 即可用性 要保证设备内的电子器件均能在规定的热环境中正常工作, 每个元器件的配置必须符合安装要求。由于现代电子设备的安装密度在不断地提高, 它们对环境因素表现出不同的敏感性, 且各自的散热量也很不一样, 热设计就必须为它们提供一种适当的“微气候”(人为地造成电子设备中局部冷却气候条件), 保证设备不管环境条件如何变化, 冷却系统都能按预定的方式完成规定的冷却功能。

(2) 保证设备热设计系统的可靠性 在规定的使用期限内, 冷却系统的故障率应比元器件的故障率低。特别是对一些强迫冷却系统和蒸发冷却系统, 为保证设备正常可靠地运行, 常采用储备方案来保证冷却系统的可靠性。同时要在系统中装有安全保护装置, 流量开关、温度继电器、压力继电器等。

(3) 热设计系统应有良好的适应性(相容性) 由于工程上的变化, 有的设备在工作一段时间后, 可能会引起热损耗或流体流动阻力的增加, 要求增大其散热能力。因此, 设计中可调性必须留有余地, 以便无须多大的变更就能增加其散热能力。

(4) 热设计系统应有良好的维修性 为了便于测试、维修和更换元件, 设备中的关键元件要易于接近和拆装。

(5) 热设计系统应有良好的经济性 经济性包括热设计系统的初次投资成本、日常运行和维修费用等。热设计系统的成本只占整个设备成本的一定比例。

### 3.1.2.3 电子设备热设计步骤

(1) 熟悉和掌握与热设计有关的标准、规范, 确定设备(或元器件)的散热面积、散热器或冷却剂的最高和最低环境温度范围。

(2) 确定可利用的冷却技术和限制条件。

(3) 对每个元器件进行应力分析, 并根据设备可靠性及分配给每个器件的失效率, 确定每个元器件的最高允许温度, 确定每个发热元器件的功耗。

(4) 画出热电模拟网络图。热电模拟方法是: 将热流量(功耗)模拟为电流; 温差模拟为电压(或称电位差); 热阻模拟为电阻, 热导模拟为电导; 对于瞬态传热问题, 可以把热容( $c_p q_m$ )模拟为电容。这种模拟方法适用于各种传热形式, 尤其是导热。

利用热电模拟的概念, 可以解决稳态和瞬态的传热计算。恒温热源等效于理想的恒压源。恒定的热流源等效为理想的电流源。导热、对流和辐射换热的区域均可用热阻来处理。热沉等效于“接地”, 所有的热源和热回路均与其相连接, 形成热电模拟网络。

(5) 由元器件的内热阻确定其最高表面温度。

(6) 确定器件表面至散热器或冷却剂所需的回路总热阻。

(7) 根据热流密度和有关因素, 对热阻进行分析和初步分配。

(8) 对初步分配的各类热阻进行评估, 以确定这种分配是否合理; 并确定可以采用的或允许采用的冷却技术是否能够达到要求。

(9) 选择适用于回路中每种热阻的冷却技术或传热方法。

(10) 估算所选冷却方案的成本, 研究其他冷却方案, 进行对比, 以便找到最佳方案。

(11) 热设计的同时, 还应考虑可靠性、安全性、维修性及电磁兼容设计。

### 3.1.2.4 冷却方法的选择

电子设备常用的散热方法有自然散热、强迫通风散热、液体冷却、蒸发冷却、半导体制冷、热管传热等。上述几种散热方式各有各的优缺点, 在使用中要根据电子设备的整体结构、技术水平、使用环境和经济指标等统一考虑, 也可把几种冷却方式结合起来使用, 以达到理想的效果。

(1) 设备内部的散热方法应使发热元器件与被冷却表面或散热器之间有一条低热阻的传热路径。在航天器内部, 由于空间没有空气, 导热和辐射是两种主要的热设计方法。在电子元器件允许的温度范围内, 导热作用比辐射更显著。

(2) 利用金属导热是最基本的传热方法, 其热路容易控制。而辐射换热则需要比较高的温差, 且传热路径不容易控制。对流换热需要较大的面积, 在安装密度较高的设备内部难以满足要求。

(3) 大多数小型电子元器件最好采用自然冷却方法。自然对流冷却表面的最大热流密度为  $0.039\text{W}/\text{cm}^2$ 。有些高温元器件的热流密度可高达  $0.078\text{W}/\text{cm}^2$ 。

(4) 强迫空气冷却是一种较好的冷却方法。若电子元器件之间的空间有利于空气流动或可以安装散热器时, 就可以采用强迫空气冷却。军用、民用和直升飞机上的仪器设备, 多数采用标准的密封或非密封的 ATR 机箱, 利用喷气发动机压气机的冲压空气对 ATR 机箱进行强迫冷却。由于冲压空气的温度和压力较高, 应在使用前使其通过冷却泵节流、冷却以及水分离等干燥处理。

(5) 直接液体冷却适用于体积功率密度较高的元器件或设备。直接液体冷却要求冷却剂与元器件相容, 其典型热阻为每平方厘米  $1.25^\circ\text{C}/\text{W}$ 。直接强迫液体冷却的热阻为每平方厘米  $0.03^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

(6) 直接沸腾冷却适用于体积功率密度很高的设备或元器件, 其热阻值为每平方厘米  $0.006^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

(7) 热电致冷是一种产生负热阻的致冷技术。优点是不需要外界动力、且可靠性高; 缺点是重量大、效率低。

(8) 热管是一种传热效率很高的传热器件, 其传热性能比相同的金属导热要高几十倍, 且两端的温差很小。应用热管时, 主要问题是如何减小热管两端接触界面上的热阻。

**【例 3-1】** 拟将功耗为  $300\text{W}$  的电子组件装在  $248\text{mm}\times 381\text{mm}\times 432\text{mm}$  的机柜里, 放在正常室温的空气中, 是否需要对此机柜采取特殊的冷却措施? 是否可以把此机柜设计得再小一些?

解: 体积功率密度为

$$\phi_v = \frac{\Phi}{V} = \frac{300}{0.248 \times 0.381 \times 0.432} = 7\,350\text{W}/\text{m}^3$$

热流密度为

$$\phi = \frac{300}{2 \times (0.248 \times 0.381 + 0.248 \times 0.432 + 0.381 \times 0.432)} = 410\text{W}/\text{m}^2$$

由于  $\phi_v$  很小, 而  $\phi$  值与空气自然冷却的最大热流密度比较接近, 因此不需要采取特殊冷却方法, 依靠空气的自然对流散热就足够了。

若采用强迫风冷,热流密度为  $3\,000\text{W}/\text{m}^2$ ,因此,采用风冷时,可以把机柜表面积减小到  $0.1\text{m}^2$  (自然冷却所需的面积为  $0.75\text{m}^2$ )。

## 3.2 电子设备的通风冷却

### 3.2.1 电子设备的自然风冷

电子设备的热设计,首先要从确定元器件或设备的冷却方法开始。冷却方法的选择直接影响元器件或设备的组装设计、可靠性、重量和成本等。自然冷却(导热、自然对流和辐射换热的单独作用或两种以上换热形式的组合)的优点是可靠性高、成本低。它不需要通风机或泵之类的冷却剂驱动装置,避免了因机械部件的磨损或故障影响系统可靠性的弊病,因此,考虑冷却方法应优先考虑自然冷却。自然对流的缺点是散热效率低,只能用在小功率的装置上。

电子设备自然冷却的传热途径是设备内部电子元器件和印制板组装件通过导热、对流和辐射等传向机壳,再由机壳通过对流和辐射将热量传至周围介质(如空气),使设备达到冷却的目的。

#### 3.2.1.1 机壳自然散热设计

##### 1. 机壳散热设计要点

电子设备的机壳是接受设备内部热,并将其散发到周围空间中去的一个机械结构,它在自然散热中起着重要作用。散热设计应从以下几方面考虑:

(1) 选择导热性能好的材料作机壳,加强机箱内外表面的热传导

机壳的材料用导热性好的金属(如铝合金),这是因为机壳内部的热量可以通过内部的金属结构件传导给机壳,再由机壳以热辐射和热对流的形式传给周围空间。

(2) 选择合适的机壳表面状况,增强热辐射能力

为了提高机壳的热辐射能力,宜采用粗糙表面,并涂覆无光泽漆,其色彩可根据需要选择。机壳内、外表面高黑度的散热效果比低黑度、开通风孔的散热效果好。机壳两侧均为高黑度的散热效果优于只是一侧高黑度时的散热效果,提高外表面的黑度是降低机壳表面温度的有效方法。

(3) 开通风孔,加强对流散热能力

在机壳内外表面增加黑度的基础上,合理地开通风孔,可以显著地加强气流的对流换热作用。通风孔的位置可开在机壳的顶部和底部及两侧面。两侧通风孔的位置应注意防止气流短路而影响散热效果。通风孔的形式很多,如图 3-1 所示。

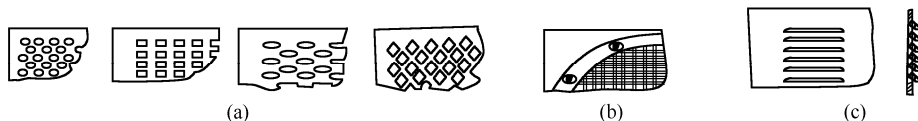


图 3-1 通风孔的结构形式

冷空气经过机壳下部的通风孔进入机箱,经发热元件吸收热量,被加热后的空气通过机壳上部的通风孔流出,如此循环,达到散热的目的。图 3-1 (a) 所示的孔由冲压而成,制造简单,但灰尘容易进入设备内部。在孔比较大时,可用金属丝编织的网格盖住,而金属网用框子固定在外壳孔的边缘上,如图 3-1 (b) 所示。冲制百叶窗是目前应用最广泛的一种,如图 3-1 (c) 所示。因为百叶窗可以防止灰尘直接落入设备内,并且可以提高机壳的强度。

开设通风孔的基本准则是：

(1) 通风孔的开设要有利于气流形成有效的自然对流通道。

(2) 进风孔尽量对准发热元器件。

(3) 进风孔与出风孔要远离，为防止气流短路，应开在温差较大的相应位置，进风孔尽量低，出风孔则要尽量高。

(4) 进风孔要注意防尘和电磁泄漏。

## 2. 机壳通风孔面积的计算

通风孔散去的热量为

$$\Phi = 7.4 \times 10^{-5} H A_0 \Delta t^{1.5} (\text{W}) \quad (3-7)$$

式中  $H$  为自然冷却设备的高度（或进、出风孔的中心距）(cm)； $A_0$  为进风孔或出风孔的面积（取较小值）(cm<sup>2</sup>)； $\Delta t = t_2 - t_1$  为设备内部空气温度  $t_2$  与外部空气温度  $t_1$  之差(°C)。

**【例 3-2】** 某电子设备的损耗功率为 100W，通过壁面自然对流和辐射散去的热流量为 75W，还有 25W 需经通风孔进行对流散热。假设设备的高度为 100cm，内部空气与周围环境空气温度的温差为 12°C，试计算通风孔面积。

解：由式 (3-7) 得：

$$A_0 = 81.3 (\text{cm}^2)$$

此处求得的为进风孔面积，在机壳上开设的通风孔面积应大于  $2 \times 81.3 = 162.6 \text{cm}^2$ 。这是由于气体受热后膨胀，出风孔面积应稍大于进风孔面积。

### 3.2.1.2 设备内部的散热设计

电子设备内部的热源主要是一些发热电子元器件，如电阻、变压器、扼流圈、晶体管、晶闸管以及集成电路等。

#### 1. 热安装的基本原则

##### (1) 合理布置元器件

① 在布置元器件时，元器件与元器件、元器件与结构件之间应保持一定的距离，以利空气的流动，增强对流传热。电子元器件安装的方位应符合气流的流动特性及有利于提高气流紊流程度。

② 对温度敏感的热敏元器件应放在设备的冷区（如冷却空气的入口处附近），不应放在发热元器件的上部，以免热量对其影响。

③ 元器件的布置可根据其允许温度分类，允许温度较高的元器件可放在允许温度较低的元器件之上；也可以根据耐热程度按递增的规律布置，在布置元器件时将本身发热又耐热性好的元器件如电阻、变压器等放在冷却气流的下游（出口处），耐热性差的元器件（如电解电容器）放在冷却气流的上游（进口处）。

④ 电子设备工作温度范围较宽，而元器件引线的热膨胀系数与印制板及焊点材料的热膨胀系数均不一致，在温度循环变化及高温条件下，将导致焊点的拉裂，印制板的翘起、剥离，元件破裂、短路，以及系统中与热应变有关的其他许多问题。带引线的电子元器件应尽量利用引线导热，安装时要防止产生热应力；安装密度较高的组件，由于元器件排列紧密，周围空间较小，允许采用环形结构，如图 3-2 (a) 所示，可得到较大的热应变变量。大的矩形元件（如变

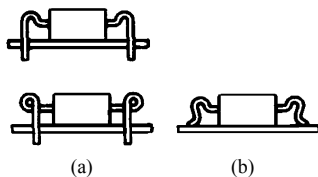


图 3-2 消除热应变的元件安装方法

压器、扼流圈等), 通常具有较粗的引线, 为了避免因热应变而使焊点脱裂, 应有较大的应变变量, 如图 3-2 (b) 所示。

⑤ 应尽可能地减小安装界面热阻 (接触热阻) 及传热路径上的各个热阻。

### (2) 合理安排印制板

① 应注意将功率大、发热量大的晶体管和集成电路放在气流的入口, 将功率小、发热量小的晶体管和集成电路放在气流的出口处, 这样可使整个印制板上元件的温度较为均匀。

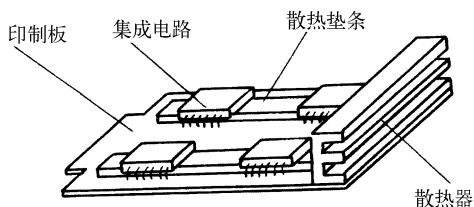


图 3-3 印制电路板设置导热条

是在集成电路的下方垫上钢或铝的带状导热条, 以减小热阻。为了降低元件与导热条之间的热阻, 可在其接触面间涂覆硅脂。

### (3) 合理安排机箱内的结构件

① 对热敏感元件, 在结构上可采用“热屏蔽”方法来解决, 如图 3-4 所示, 采用热屏蔽能使设备内部造成温差, 形成热区和冷区。

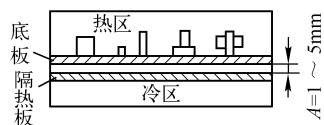


图 3-4 热屏蔽形成热区和冷区

② 应合理地布置机箱进、出风口的位置, 尽量增大进、出风口之间的距离和它们的高度差, 以增强自然对流。图 3-5 (a) 表示进、出风口位置不当, 有一部分空间不能内、外对流, 使局部散热不好。

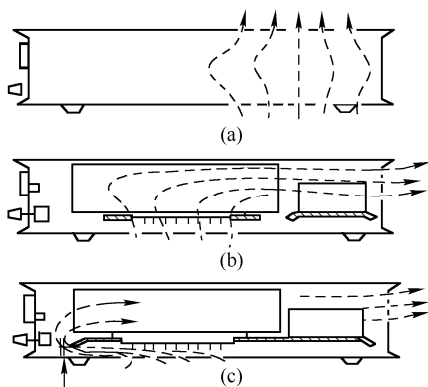


图 3-5 机箱气流阻力的不同情况

③ 对于大面积的元器件应特别注意其放置位置, 如机箱底的底板、隔热板、屏蔽板等。图 3-5 (b) 所示为固定印制板电路板采用的“空格式”结构, 用金属条支持印制板插座、具有流动阻力小、机械强度高优点。而图 3-5 (c) 为大面积底板挡住了机箱底部的通风孔, 使空气不得不拐弯并流过较长的路径, 这对自然对流很不利。

## 2. 典型元器件的热安装

### (1) 电阻

电阻的温度与其型式、尺寸、功率损耗、安装位置以及环境温度等因素有关。电阻一般是通过固定连接片或引线两端的传导以及本身的辐射、对流进行散热的。例如, 在室温下, 功率小于 0.5W 的碳膜电阻, 通过传导散去的热量占 50%, 对流散热占 40%, 辐射散热占 10%。电阻表面常涂覆无光泽的粗糙漆, 放置的位置应便于对流散热, 并加大与其他元件之间的距离。

若有多个电阻器, 最好将它们垂直安装。长度超过 100mm 的单个电阻器应该水平安装, 其平均温度稍高于垂直安装的平均温度, 但水平安装时, 其场的位置温度要比垂直安装时低得多, 而且温度分布也比较均匀。

如果元件与功率电阻器之间的距离小于 50mm, 则需要在大功率电阻器与热敏元件之间加热屏蔽板。



若电阻器紧密安装,间距小于或等于 6mm 时,就会出现相互加热的现象。此时,电阻器的水平或垂直安装方式,对温度场的影响不明显。

### (2) 变压器

变压器主要靠传导散热。如果变压器不加屏蔽罩,则铁芯与支架、支架与固定面应有良好的接触,使其热阻最小。对于加屏蔽罩的变压器,除要求外罩与固定面良好接触外,可将变压器在固定面上用支架垫高,并在底板上开通风孔,使气流形成对流,如图 3-6 所示。

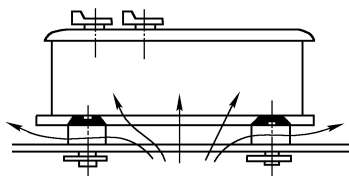


图 3-6 元器件对流散热

### (3) 晶体管

在电子设备中,流过晶体管集电极 PN 结的电流产生热量,必须采取有效的方法将这些热量散发出去,否则晶体管的工作性能会变坏,严重时还会烧坏。目前,改进管子散热能力的主要方法是把晶体管安装在散热器上,以利于自然对流与辐射换热。散热器用导热性能良好的铜、铝等金属制成,表面涂黑。晶体管装上散热器后,热阻大大降低,最大允许集电极功耗显著增加,一般可增大 5 倍以上,所以在输出功率大于 1W 时,晶体管总是要装上适当的散热器。

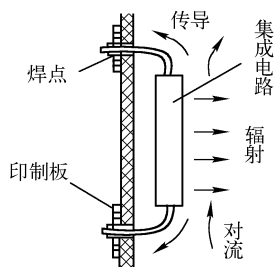


图 3-7 集成电路一般散热途径

### (4) 集成电路

对于一般集成电路的散热,主要依靠其外壳及引出线的对流、辐射和传导散热,如图 3-7 所示。

当集成电路的热流密度超过  $0.6\text{W}/\text{cm}^2$  时,应装散热装置,以减小热阻。

## 3. 印制电路板 PCB (Printed Circuit Board) 的热设计

### (1) 选材

① 印制板的导线由于通过电流而引起的温升加上规定的环境温度应不超过  $125^\circ\text{C}$ 。由于元件安装在印制板上也发出部分热量,影响工作温度,选择材料和印制板设计时应考虑到这些因素,热点温度应不超过  $125^\circ\text{C}$ 。尽可能选择更厚一点的覆铜箔。

② 特殊情况下可选择铝基、陶瓷基等热阻小的板材。

③ 采用多层板结构有助于 PCB 热设计。

### (2) 保证散热通道畅通

① 充分利用元器件排布、铜皮、开窗及散热孔等技术建立合理有效的低热阻通道,保证热量顺利导出 PCB。

② 散热通孔的设置。设计一些散热通孔和盲孔,可以有效地提高散热面积和减少热阻,提高电路板的功率密度。在电路生产过程中焊锡将其填充,使导热能力提高,电路工作时产生的热量能通过通孔或盲孔迅速地传至金属散热层散发掉。在一些特定情况下,专门设计和采用有散热层的电路板,散热材料一般为铜等材料,如一些模块电源上采用的印制板。

③ 使用导热材料。为了减少热传导过程的热阻,在高功耗器件与基材的接触面上使用导热材料,提高热传导效率。

④ 工艺方法。一些双面装有器件的区域容易引起局部高温。为了改善散热条件,可以在焊膏中掺入少量的细小铜料。这样,再流焊 (Re-flow Soldering) 后在器件下方焊点就有一定的高度,使器件与印制板间的间隙增加,从而增加对流散热。

### (3) 元器件的排布要求

① 对 PCB 进行软件热分析, 对内部最高温升进行设计控制。

② 发热器件应尽可能处于气流通道上; 热量较大或电流较大的元器件不要放置在印制板的角落和四周边缘, 只要有可能应安装于散热器上, 并远离其他器件, 并保证散热通道通畅; 可以考虑把发热高、辐射大的元件专门设计安装在一个印制板上。

③ 板面热容量均匀分布, 注意不要把大功耗器件集中布放, 如无法避免, 则要把矮的元件放在气流的上游, 并保证足够的冷却风量流经热耗集中区。

④ 使传热通路尽可能短, 使传热横截面尽可能大。

⑤ 尽可能利用金属机箱或底盘散热。

⑥ 元器件布局应考虑到对周围零件热辐射的影响。对热敏感的部件、元器件(含半导体器件)应远离热源或将其隔离。

⑦ (液态介质) 电容器最好远离热源。

⑧ 尽可能使进气与排气有足够的距离。

⑨ 附加子板、器件风道与通风方向一致。

⑩ (小信号放大器外围器件) 尽量采用温漂小的器件。

#### (4) 布线时的要求

① 根据器件电流密度规划最小通道宽度; 要特别注意接合点处通道布线。

② 大电流线条尽量表面化; 在不能满足要求的条件下, 可考虑采用汇流排。

③ 要尽量降低接触面的热阻。为此应加大热传导面积; 接触平面应平整、光滑, 必要时可涂覆导热硅脂。

④ 热应力点考虑应力平衡措施并加粗线条。

⑤ 散热铜皮需采用消热应力的开窗法, 利用散热阻焊适当开窗。

⑥ 尽可能采用表面积大的铜箔。

⑦ 对印制板上的接地安装孔采用较大焊盘, 以充分利用安装螺栓和印制板表面的铜箔进行散热。

⑧ 尽可能多安放金属化过孔, 且孔径、盘面尽量大, 依靠过孔帮助散热。

⑨ 根据器件功耗、环境温度及允许最大结温来计算合适的表面散热铜箔面积器件散热。

⑩ 采用表面大面积铜箔可保证的情况下, 出于经济性考虑可不采用附加散热器的方法。

#### (5) 热分析

热分析可协助设计人员确定 PCB 上部件的电气性能, 帮助设计人员确定元器件或 PCB 是否会因为高温而烧坏。简单的热分析只是计算 PCB 的平均温度, 复杂的则要对含多个 PCB 和上千个元器件的电子设备建立瞬态模型。

无论分析人员在对电子设备、PCB 以及电子元件建立热模型时多么小心翼翼, 热分析的准确程度最终还要取决于 PCB 设计人员所提供的元件功耗的准确性。如果元件的实际功耗很小, 可能会导致设计的安全系数过高, 从而使 PCB 的设计采用与实际不符或过于保守的元件功耗值作为根据进行热分析, 与之相反(同时也更为严重)的是热安全系数设计过低, 即元件实际运行时的温度比分析人员预测的要高, 此类问题一般要通过加装散热装置或风扇对 PCB 进行冷却来解决。这些外接附件增加了成本, 而且延长了制造时间, 在设计中加入风扇还会给可靠性带来一层不稳定因素, 因此 PCB 现在主要采用主动式而不是被动式冷却方式(如自然对流、传导及辐射散热), 以使元件在较低的温度范围内工作。

热设计不良最终将使成本上升而且还会降低可靠性, 这在所有 PCB 设计中都可能发生。花

费一些工夫准确确定元件功耗，再进行 PCB 热分析，这样有助于生产出小巧且功能性强的产品。应使用准确的热模型和元件功耗，以提高 PCB 设计效率。

准确确定 PCB 元件的功耗是一个不断重复迭代的过程，PCB 设计人员需要知道元件温度以确定出损耗功率，热分析人员则需要知道功率损耗以便输入到热模型中。设计人员先猜测一个元件工作环境温度或从初步热分析中得出估计值，并将元件功耗输入到细化的热模型中，计算出 PCB 和相关元件“节点”（或热点）的温度，第二步使用新温度重新计算元件功耗，算出的功耗再作为下一步热分析过程的输入。在理想情况下，该过程一直进行下去直到其数值不再改变为止。

然而 PCB 设计人员通常面临需要快速完成任务的压力，他们没有足够的时间进行耗时重复的元器件电气及热性能确定工作。一个简化的方法是估算 PCB 的总功耗，将其作为一个作用于整个 PCB 表面的均匀热流量。热分析可预测出平均环境温度，使设计人员用于计算元器件的功耗。

一般电子元器件制造商都提供有元器件规格，包括正常工作的最高温度。元件性能通常会受环境温度或元件内部温度的影响，消费类电子产品常采用塑封元件，其最高工作温度是 85℃；而军用产品常使用陶瓷件，最高工作温度为 125℃，额定最高温度通常是 105℃。PCB 设计人员可利用器件制造商提供的“温度/功率”曲线确定出某个温度下元件的功耗。

PCB 受到各种类型热量的影响，可以应用的典型热边界条件包括：

- ① 前后表面发出的自然或强制对流。
- ② 前后表面发出的热辐射。
- ③ 从 PCB 边缘到设备外壳的传导。
- ④ 通过刚性或挠性连接器到其他 PCB 的传导。
- ⑤ 从 PCB 到支架（螺栓或黏合固定）的传导。
- ⑥ 两个 PCB 夹层之间散热器的传导。

目前有很多种形式的热模拟工具，基本热模型及分析工具包括分析任意结构的通用工具、用于系统流程/传热分析的计算流体力学（CFD）工具，以及用于详细 PCB 和元件建模的 PCB 应用工具。

板级热仿真软件可以在三维结构模型中模拟 PCB 的热辐射、热传导、热对流、流体温度、流体压力、流体速度和运动矢量，也可以模拟强迫散热、真空状态或自然散热等。目前可做板级热分析的软件比较典型的有 Flotherm, Betasoft 等。

在系统级热分析预估及器件级热设计的基础上，通过板级热仿真预估热设计结果，寻找设计缺陷，并提供系统级解决方案或变更器件级解决方案。通过热性能测量对热设计的效果进行检验，对方案的适用性和有效性进行评价。

#### 4. 散热器的选用

在风冷散热器中，严格地说三种传热方式都有，但 99% 以上的热都是通过热传导和热对流散出去的，而热辐射散出的不足 1%，所以一般可忽略不计；而在自冷散热时除了热传导和热对流外，热辐射散出的热量也要超过 1%，所以应给予考虑。

##### （1）散热器的类型

① 平板型散热器。它是最简单的一种散热器，如图 3-8 (a) 所示。它由 1.5~3mm 厚的金属薄板制成，一般多为正方形或长方形的铝板或铝合金板。对于一些中、小功率的晶体管，可以直接安装在金属板上进行散热。若要使所占的空间较小，则大多采用垂直安装，而且垂直安装的热阻比水平安装要小。

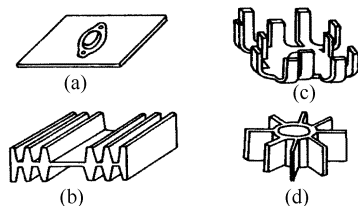


图 3-8 散热器的四种形式

② 铝型材（平行筋片）散热器。这是由铝合金挤压成型的具有平行筋片的铝型材做成的散热器，如图 3-8（b）所示。这种散热器散热能力强，一般用做大、中功率晶体管的散热器。

③ 叉指型散热器。它是用铝板冲制而成的，如图 3-8（c）、（d）所示。这种散热器制作工艺简单，结构形式多样，可用做中、大功率晶体管的散热器。

平行筋片散热器和叉指型散热器已标准化，被广泛使用。

#### （2）散热器设计的基本准则

① 选用导热系数大的材料（如铜和铝等）制作散热器；散热器材料质量特性对散热效率有显著影响。紫铜导热系数相当于工业纯铝的 2 倍，在相同散热效率下，紫铜散热器的体积为铝质散热器的  $1/3 \sim 1/2$ ，并且有耐盐露等优点。但由于铜的密度大、价格高（为铝材的 3 倍左右），一般较少应用。在风冷装置内部的冷却风速标准值为  $6\text{m/s}$ ，若风速小于该值时，应根据制造单位所提供的资料选取对应于实际风速的热阻。

② 尽可能增加散热器的垂直散热面积，肋片间距不宜过小，以免影响对流换热。同时，要求尽可能地减小辐射的遮蔽，以便提高其辐射换热的效果。

③ 用以安装晶体管的安装平面要平整、光洁，以减小其接触热阻。

④ 散热器的结构工艺性和经济性要好。

#### （3）散热器的选择

选用散热器的主要依据是半导体器件的内热阻（结壳热阻与接触热阻之和）和耗热功率；其次是器件的最高工作结温和冷却介质温度。根据器件工作主电流，按最高工作结温、冷却条件、内热阻等算出选用散热器的允许热阻。热阻只是选择散热器的一个主要条件，在选用中还要考虑其他的一些条件，如结构、体积、环境要求、安装位置、尺寸、流阻和经济条件等。

在多个器件串联时，安装中要注意散热器的流阻，不能使流阻过大，影响流体的流动而导致散热效率下降。

#### （4）散热器的使用

紧固力（力矩）是使散热器与器件组装后，具有良好热接触的安装力或安装力矩。根据器件容量的不同，分螺栓式器件和平板式器件。为减小热阻，螺栓型器件必须有一定锁紧力，平板型器件必须有一定的压紧力；力过大或过小，对散热都是不利的。平板型器件在没有给出规定压力的情况下，一般取单位面积的压强为  $20 \sim 30\text{MPa}$ 。力太小不能使散热器和器件具有良好的接触，使接触热阻过大；力过大造成构件塑性变形，甚至使结构破坏，接触面反而减小也使热阻增大。为此在安装时要特别注意按厂家或标准中给出的紧固力加压，保证压力适宜。

散热器安装时，自冷散热器叶片应平行于垂直上下的冷热空气自然对流方向。还应注意器件和散热器的表面是否有磕碰或划伤损坏，因为表面不平度和不平行度可使接触热阻成倍变化。另外，一定要清理干净，用绸布蘸酒精清除油污，保证安装后有良好的接触；必要时，可在散热器和器件台面之间涂一薄层导热物质，如硅脂，以增加有效的接触面积。

### 3.2.2 电子设备的强迫风冷

在一些热流密度比较大、温升要求比较高的设备中，多数要求采用强迫空气冷却。采用风机强迫空气以一定的速度流过散热器，一般取  $6\text{m/s}$ ，使散热效率提高，但噪声大，结构也相对自然冷却复杂。

强迫空气冷却与液体冷却、蒸发冷却相比较，具有结构简单、费用低、维护方便等优点。因此，尽管强迫通风冷却系统的体积和重量大些，但对中、大功率的陆用电子设备还是非常合适的。

一种冷却方法。

### 3.2.2.1 强迫冷却的基本形式

#### 1. 整机的抽风冷却

整机的抽风可分为有风管和无风管两种型式,如图 3-9 所示。

抽风冷却主要适用于热耗散比较分散的整机,热量经专门的风道或直接排到设备周围的大气中。抽风的特点是风量大、风压小、各部分风量分布比较均匀。由于热空气的密度较小,它有一个上升力,所以抽风机常装在机柜顶部或机柜两侧,其出风口也在此处,并面对大气。进风口在机柜的下部,进风口应装滤尘器。

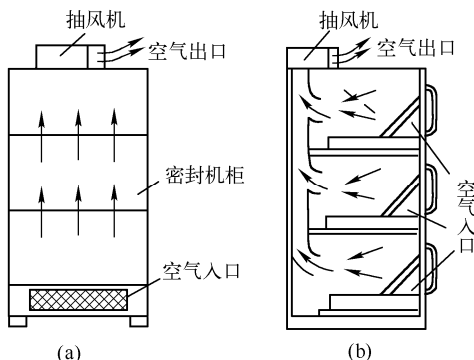


图 3-9 抽风冷却

无风管的抽风系统多用于机柜内各元件冷却表面风阻较小的设备。当各单元有热敏感元件时,为防止上升气流流过热敏感元件,就需用专用的管道,气流方向如图 3-9 (b) 所示,进风口开在机柜两侧,并装防尘器。

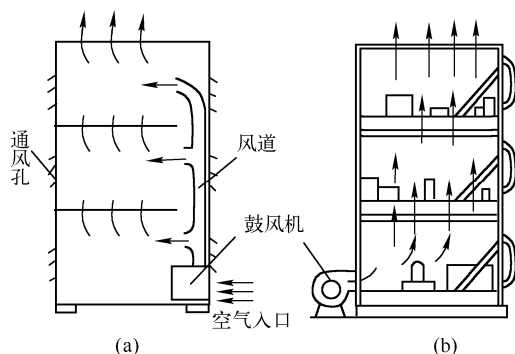


图 3-10 鼓风冷却

#### 2. 整机的鼓风冷却

整机鼓风的特点是风压大、风量比较集中,适用于各单元需要有专门风道冷却、风阻较大、元件较多的场合。整机的鼓风冷却可分为有鼓风管道和无鼓风管道两种。图 3-10 (a) 为有鼓风管道形式,便于控制各单元的风量;图 3-10 (b) 为无鼓风管道形式,适用于在底层内具有风阻较大的元件、中上层无热敏元件的场合。

### 3.2.2.2 强迫通风系统的设计

#### 1. 强迫空气冷却系统的设计步骤

- (1) 确定冷却空气入口和出口的温度和压力。
- (2) 根据可靠性要求确定每个元器件的最高允许温度(或温升)。
- (3) 根据电性能和空间位置以及冷却功率的要求确定元器件的排列和布置方式。

(4) 确定雷诺数。雷诺数是用来判断流体流动状态的标准参数。雷诺通过长期试验研究,发现流体的流动状态与流速、管道直径和流体运动黏性等因素有关,并总结出判断流体状态的数值,称为雷诺数,用  $Re$  表示。对一般无扰动因素的直管段来说,当雷诺数  $Re < 2\,300$  时,流体流动状态为层流;当  $Re > (3\,000 \sim 4\,000)$  时,流动状态为紊流。

(5) 根据系统的结构尺寸和雷诺数,计算空气流过每个电子元器件或元器件组的质量流量(或体积流量)。

(6) 计算系统的总压力损失及需要的冷却功率。

#### 2. 强迫空气冷却的机箱和机柜设计

- (1) 进气孔应设置在机箱下侧或底部,紧靠排列的系列机柜的进气孔应开在机柜的前下侧。
- (2) 排气孔应设置在靠近机箱的顶部,机箱上端边缘是首先选择的位置。

(3) 应使冷却空气从热源中间流过, 防止气流短路。

(4) 进气孔应设置过滤网, 并考虑过滤网的阻力损失。

### 3. 印制板组件的强迫空气冷却

当不允许冷却空气和器件表面直接接触时, 可以把印制板组件背靠背形成一个空心冷却空气通道进行冷却。空心印制板风冷设计的主要问题是密封, 注意应使强迫通风与自然通风方向一致。

### 4. 电子元器件的风冷设计

大功率晶体管的外表面积不够大, 不能满足直接强迫空气冷却, 必须采用扩展表面的散热器。

大规模集成电路的功率密度比较大, 可以采用直接强迫空气冷却。注意应使其一个平面暴露在流速较高的风道中进行冷却。

电阻器成组安装时, 它们之间的空隙应尽可能大。当电阻器装在一块垂直板或底座上时, 电阻器的轴线必须垂直。当电阻器轴线呈水平方向时, 电阻器必须叉排, 以提高其紊流程度和冷却效果。

电子设备用的变压器和电感器内热阻很大, 因此采用强迫风冷时, 变压器与散热器之间应具有低热阻的传热路径。

### 5. 紊流器

强迫空气冷却时, 就局部冷却而言, 紊流比层流的效果要好。强迫空气冷却的设备应保证紊流出现在靠近发热器件的表面, 其措施是适当地使热源相互靠近, 或者靠近管道壁使距离间隙缩小, 或者加装紊流器以便增加其紊流程度。图 3-11 (a) 是在垂直于气流方向上装一个紊流器, 图 3-11 (b) 是在热源前放一横排小棒的紊流器。

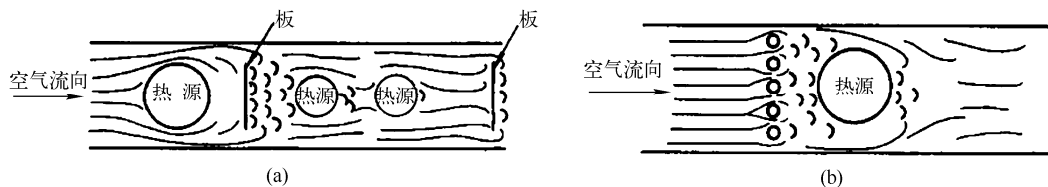


图 3-11 紊流器

### 6. 通风管道设计

(1) 通风管道应尽量短 (缩短管道长度可以降低风道的阻力损失), 制造和安装要简单。

(2) 避免采用急剧弯曲的管道, 以减少阻力损失。

(3) 避免骤然扩展或骤然收缩。扩展的张角不得超过  $20^\circ$ , 收缩的锥角不得大于  $60^\circ$ 。

(4) 为了取得最大的空气输送能力, 应尽量使矩形管道接近于正方形; 矩形管道长边与短边之比不得大于  $6:1$ 。

(5) 尽量使管道密封, 所有搭接台阶都应顺着流动方向。

(6) 对一些大机箱尽可能采用直的锥形风道。直管不仅容易加工, 且局部阻力小; 锥形直管能保证气流在风道中不产生回流 (负压), 可达到等量送风的要求。如大型计算机静压室等量送风管道就属这一类型。图 3-12 是某电子设备的通风管道图, 它能为每个含有印制板的单元实现等量送风的要求。

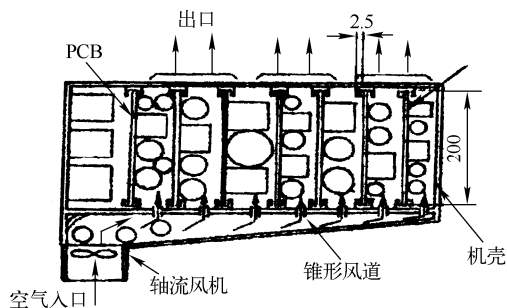


图 3-12 锥形通风管道图

(7) 进风口结构应使其气流的阻力最小，且要起到滤尘作用。

(8) 应采用光滑材料做通风道，以减小摩擦损失。

通风系统压力损失包括沿程阻力损失和局部阻力损失两种。沿程阻力损失是由气流相互运动产生的阻力及气流与系统（或管道）的摩擦所引起的损失。局部阻力损失是气流方向发生变化或管道截面发生突变所引起的损失。

## 7. 通风机的选择及应用

### (1) 通风机的分类

通风机按其工作原理及结构形式可以分为两类：轴流式通风机和离心式通风机。

① 轴流式通风机。其空气进、出口的流动方向与轴线平行，其特点是风量大、风压小。根据结构形式，它又可分为螺旋桨式、圆筒式和导叶式三种。

a. 螺旋桨式风扇。普通用的电风扇或排风扇均属这种类型，一般都作流通空气用，也有作散热器的冷却风扇用的。

b. 圆筒式轴流通风机。FZJ 系列、DZJ 系列均属此类，如图 3-13 所示。其特点是在螺旋桨形叶轮的外面围有圆筒，其叶尖漏损小，效率比前一种高。

c. 导叶式轴流通风机。其结构与圆筒式相同，仅在出口或进口处加装导风叶，用以引导气流，减少涡流损失。此种风机效率高，静压效率一般可达 95%。

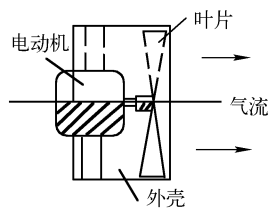


图 3-13 圆筒式轴流通风机

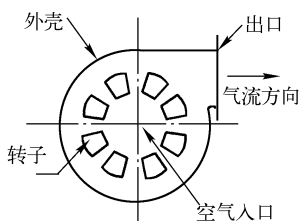


图 3-14 离心式通风机

② 离心式通风机。它由螺壳（包括空气的入口和出口）、转动的叶轮及外部的驱动电动机三个主要部件组成，如图 3-14 所示（不包括电动机）。空气从轴向进入，然后转  $90^\circ$ ，在叶轮内作径向流动，并在叶轮外周压缩，再经螺壳由出风口排出。叶轮由很多叶片组成，其风压由离心力产生。这类通风机的特点是风压高、风量小，常用于阻力较大的发热元件或机柜的通风冷却。

离心式通风机按叶片形状，可分为前弯式、径向式和后弯式，如图 3-15 所示。

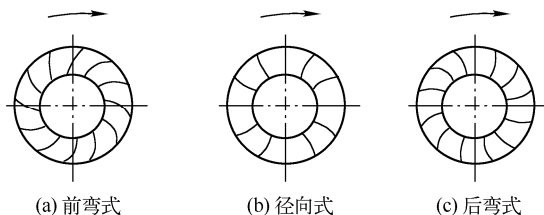


图 3-15 叶片的形状

在叶轮速度和直径相同的条件下，前弯式叶片产生的压力最大，后弯式叶片产生的压力最小。当通风机尺寸受限制时，应采用前弯式叶片的通风机，但是其工作稳定性较差。径向式通风机介于这两种通风机之间，其机械强度比前两种都好。径向式和前弯式最适用于电子设备的冷却。在给定转速和尺寸的条件下，前弯式通风机最好，因为它的压力最大。

### (2) 通风机的选择

选择通风机时，需要考虑的因素很多，诸如空气的流量、风压、通风机效率、空气的速度、

通风系统的阻力特征、环境条件、噪声、体积和重量等，其中主要参数是风量和风压。应根据通风冷却系统所需的风量、风压及环境条件（包括空间大小）选定通风机的类型。对要求风量大、风压低的设备可采用轴流式通风机，反之可选用离心式通风机。

选择电子设备冷却用的通风机时，噪声是应重点考虑的因素之一。一般通风机的叶尖若以高的线速度工作，并且所产生的静压在 500Pa 以上，则通风机所产生的噪声将随转速的提高而增大。在使用通风机时，应使其噪声控制在允许的强度范围内，以免影响操作人员的正常工作。通风机安装在机柜上时，可在通风机下面安装减振器，并在通风机出口处与风管之间接一段软管（如帆布制成的风管），进行隔振，以减小噪声。

### （3）通风机的串、并联

当通风系统所选通风机的风量或风压不能满足要求时，可用风机的串联或并联解决。

① 通风机的串联使用。当通风机的风量能满足需要，但风压小于风道的阻力时，可采用通风机串联，以提高其工作压力。通风机串联时，风量基本上等于每台风机的风量，风压相当于两台风机压力之和，如图 3-16 所示。

② 通风机的并联使用。通风机并联的风压是每个风机的风压，总风量为各风机风量之和，如图 3-17 所示。从图中可以看出，当风道特性曲线平坦、需增大风量时，可采用并联系统。通风机并联使用的优点是气流路径短、阻力损失小、气流分布比较均匀，但效率低。

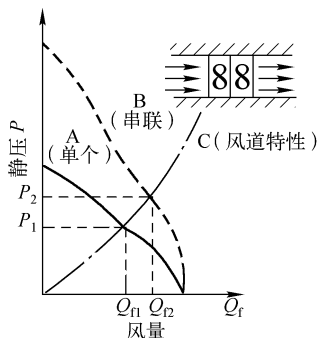


图 3-16 通风机串联特性曲线

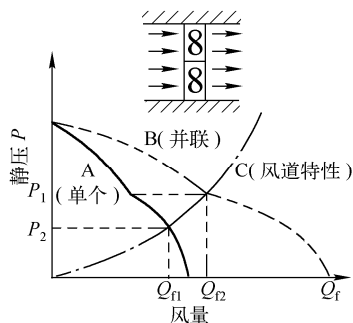


图 3-17 通风机并联特性曲线

### （4）结构因素对风冷效果的影响

① 通风机的位置。强迫通风冷却时，气流的方向及通风机的位置等将影响冷却效果。轴流式鼓风系统，风机位于冷空气的入口处，把冷空气直接吹进机箱内，可以提高机箱内的空气压力，并产生一部分涡流，改善换热性能。但是，在鼓风系统中，通风机电动机的热量也被冷空气带入机箱，影响散热效果；非密封式设备还有漏风现象。

轴流式抽风系统，由于是从机箱内抽出受热的空气，故将减小机箱内的空气压力。通风机电动机的热量不仅不会进入机箱内，而且还可以从机箱的其他缝隙中吸入一部分冷空气，提高冷却效果。

轴流式通风机叶片安装位置也将影响其冷却效果。由气流流场分布测量结果可知：叶片应装在通风道的下游，这时风道较长，气流速度分布可以得到改善。图 3-18 是两种不同位置的速度分布。

如果通风机安装在一个受限制的位置，例如风道  $90^\circ$  的弯曲处，则叶片应装在气流的下游。如果安装在气流的上游，则在出口处容易形成涡流，而影响冷却效果。



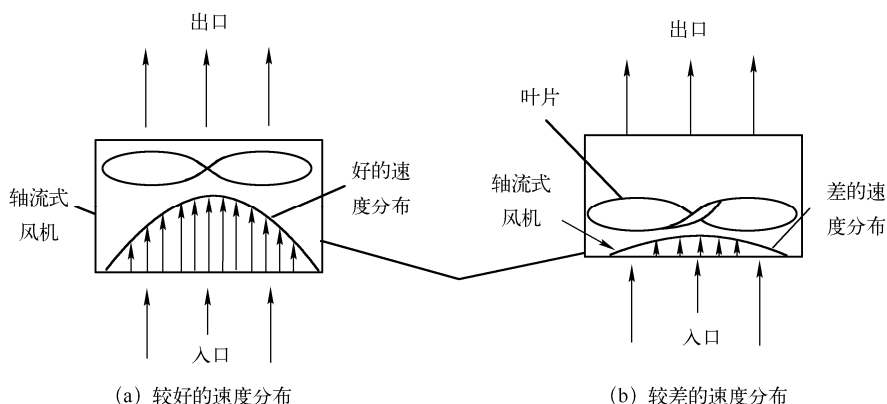


图 3-18 叶片不同位置的速度分布

图 3-19 是两种不同的安装形式的比较：图 3-19 (a) 是叶片安装在气流的下游，速度分布较好，冷却效果也较好；图 3-19 (b) 是叶片安装在气流的上游，速度分布和冷却效果较差。

② 结构形式。具有平行风道的冷却系统，要求气流进入机箱后，形成高的静压和低的动压，以便提高冷却效果、降低出口和弯曲处的压力损失。如果电子机箱比较长、功耗较大，而风道截面不增加时，则必须增加冷却空气的流速。如图 3-20 (a) 所示的结构，上下风道截面不变而且相等时，流体流至下风道叉口处膨胀，使压力上升，而且

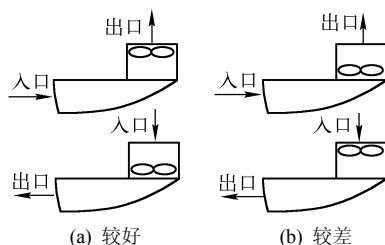


图 3-19 两种不同安装形式的比较

可能产生下风道叉口处的压力大于上风道叉口处的压力，将导致气流回流。即使支管存在阻力损失，可以缓和这种现象，但仍可能出现下风道叉口处的压力大于上风道叉口处压力与支管阻力损失之和，而产生回流现象。为防止气流回流，进口风道截面积应大于各分支风道截面积的总和，如图 3-20 (b) 所示，采用锥形风道结构形式，可以使风道中任意一点的截面积大于支风道的截面积。

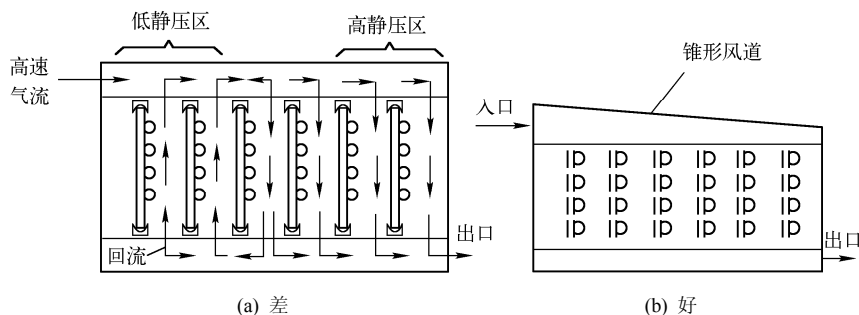


图 3-20 风道结构形式的影响

③ 元件的排列。为了提高冷却效果，在冷却气流流速不大的情况下，元件应按交错方式排列，这样可以提高气流的紊流程度，增加散热能力。

### 3.3 电子设备的液体冷却

液态冷却可将导热系数较之气体冷却提高 2 个数量级，因而可以大大减小各有关换热环节的

热阻, 提高冷却效率。因此, 对于功率密度大 (如高达  $600\text{W}/\text{cm}^2$ ) 的电力电子装置 (如速调管、行波管、返波管、磁控管等) 而言, 液体冷却是最好的选择。但液体冷却系统需要利用循环泵来保证冷却液在热源和冷源之间循环, 以交换热量。系统比较复杂, 体积和重量较大, 设备费用较高, 维修也较困难。

在水冷散热器中, 通过一定流量的水将热量带走, 流量一般取  $4\text{L}/\text{min}$ 。它的优点是散热效率高、噪声低, 缺点是需要水处理和循环设备, 且容易产生结露、漏水、电腐蚀; 多用在化工、电解、电冶炼等大功率装置上。

油冷和水冷同属液冷, 油冷的优点是不易结冻, 不需水处理设备; 但其缺点是冷却效率较差, 结构复杂, 维护较难。

沸腾冷却是利用加热区蒸发放热, 冷凝区蒸气凝结放热, 这两种放热都具有很高的放热系数及散热能力, 但系统复杂、昂贵, 一般只用在特殊的地方。

### 3.3.1 液体冷却的类型

#### 3.3.1.1 直接液体冷却

直接液体冷却就是冷却液体与发热的电子元器件直接接触, 进行热交换。热源将热量传给冷却液体, 再由冷却液体将热量传递出去。冷却液体的对流和蒸发是热源散热的主要方式。

##### 1. 发热的电子元器件直接浸入冷却液体 (无蒸发)

###### (1) 无搅动的直接液体冷却

电子元器件装在一个密封的机壳内, 里面充以冷却液体。这种装置的传热途径是: 发热元件的热量通过液体的自然对流及导热传给液体, 液体将吸收到的热量传给机壳, 最后由机壳将热量散发到周围空气中去。它与风冷相比, 主要是降低了从元器件到周围介质的对流热阻, 大约可以降低一个数量级。

直接液体冷却适用于体积功率密度较高的电子元器件或部件, 也适用于那些必须在高温环境条件下工作、且元器件与被冷却表面之间的温度梯度又很小的部件。设计这种系统时要注意下面几个问题:

① 所选用的冷却液, 其电气性能应满足机内元器件之间的电气绝缘要求, 其黏度应尽量低, 以利于液体的自然对流, 降低传热热阻。

② 机壳要解决密封问题。灌注冷却液体后, 机壳内部要留有一定的间隙, 以适应液体受热膨胀的需要。

③ 机壳要有足够的强度。

④ 元器件的配置要有利于液体的自然对流, 元器件能够承受由于液体的高介电常数和功率因数引起寄生电容的增加和电气损失。

⑤ 设备的维修要方便。对一次性使用的设备, 可不必考虑这个问题。

###### (2) 有搅动的液体冷却设备

加搅动的目的是为了加强冷却液体的对流换热, 对黏性大的液体更为适用。采用这种冷却方法时, 必须考虑下列附加因素: 电动机的尺寸、转速 (紊流将产生热)、搅动杆的叶片数、杆和叶片材料与液体的化学相容性等。同时要注意机壳的密封性并保证其强度, 还要留有一定的热膨胀空间; 等等。

##### 2. 元器件或组件直接浸入冷却液 (有蒸发)

这种冷却系统是将电子元器件或组件浸入介电冷却液中, 热量从发热体传至冷却液, 再传至

机箱壁；伴随着沸腾和冷凝过程，产生较高的换热系数和小范围的自然对流。该法适用于热流密度较高、高组装密度的元器件和组件的冷却，如大规模和超大规模集成电路的冷却，其热阻为每平方厘米  $0.006^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

此类冷却系统按产生蒸汽的传热过程可分为蒸汽不再循环和再循环两种形式。不再循环系统冷却介质的汽化过程一直可进行到补给容器（储液箱）内的液体用尽为止，液体的沸点和元器件温度，可由调节蒸汽压力来控制。再循环系统的冷凝器可以放在机箱外，也可以放在机箱内，还可以把冷凝器浸没在冷却介质中。此时，冷凝器表面主要用来使其周围的液体过冷，并使上升的气泡在流体中冷凝。

### 3. 直接强迫液体冷却

直接强迫液体冷却系统包括低压泵、管路、热交换器和膨胀箱等。低压泵使冷却液在系统中循环；膨胀箱可作为液体受热膨胀的补偿及防止系统被蒸汽堵塞之用；热交换器将受热的液体冷却后由泵送回到储液箱内，这种系统应注意元器件的排列，以达到最佳冷却效果。若泵的压力较高，则应防止高压液流直接冲向脆弱的电子元器件。

直接液体冷却适用于体积功率密度较高的电子元器件或设备，也适用于那些必须在高温环境条件下工作、且元器件与被冷却表面之间的温度梯度又很小的部件。其典型面积热阻为每平方厘米  $1.25^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。直接液体冷却可分为直接浸没冷却和直接强迫冷却。直接强迫液体冷却的热阻为每平方厘米  $0.03^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，这种冷却方法的效率较高，但增加了泵功率和热交换器等部件。如果采用喷雾浸没冷却，可以减轻冷却设备的重量。

#### 3.3.1.2 间接液体冷却

##### (1) 导热模块

具有高组装密度的多芯片模块（MCM）的热量，用一般的冷却技术（如风冷）已无法满足要求，特别是对那些大型计算机的高性能微处理器更是如此。图 3-21 是 IBM3081 计算机中微处理器的导热模块结构示意图，每个导热模块包含多层陶瓷基板、118 个芯片、导热活塞、加载弹簧、模块罩、氦气和水冷冷板等，冷却液（水）与发热芯片不直接接触。采用这种导热模块后，芯片的热流密度可达  $20\text{W}/\text{cm}^2$ 。

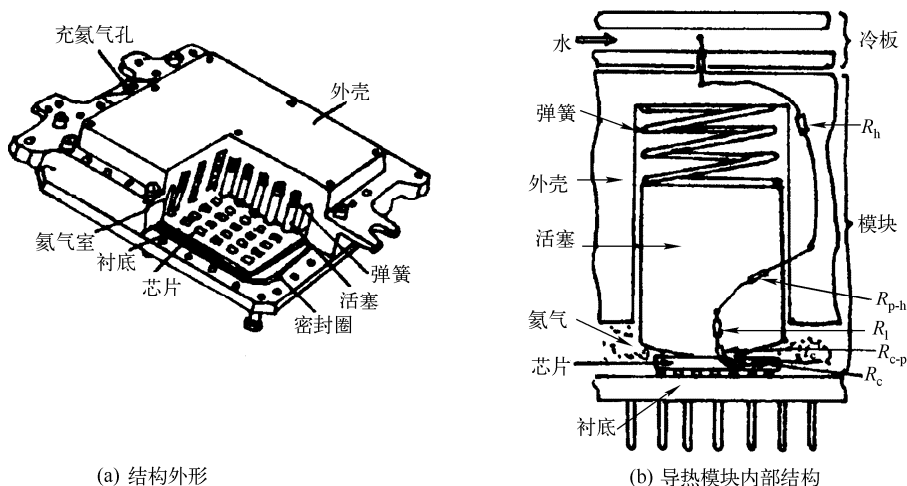


图 3-21 导热模块结构示意图

应用时应该注意使电子元器件与冷板之间要有良好的金属接触导热。

### (2) 机箱(柜)空气-液体冷却

在舰船用电子机箱中,普遍采用间接冷却的空气-液体冷却系统。间接冷却系统中的冷却液不与电子元器件直接接触,而是将电子元器件装在一个由液体冷却的冷板上。这个冷板既作为安装电子元器件的底盘,又作为热交换器。元器件的热量通过传导传至冷板,再由冷板传给冷却液,并由冷却液将热量带走。冷板做成夹层结构形式或用管子(冷却液通道)与冷板表面紧密接触,形成低热阻通路,达到有效冷却。

### (3) 循环式水冷系统

早期的水冷却系统多采用直流式,即冷却水流过被冷却物体后即被直接排放,造成了水资源的大量浪费,且用过的冷却水中所含的杂质排入地下又会对水质造成污染。为节约用水,从20世纪中期开始,直流式逐渐被循环式水冷系统所取代。比如我国舟山第1台直流输电换流器采用的是敞开式循环水冷系统,即利用喷淋、鼓风等方式,把热量散发到空气中。与直流式冷却系统相比,这种冷却方式的优点是能耗较小且水的消耗可降低30~50倍。但由于采用敞开式结构,带来一系列新的问题。一是由于喷淋过程中水的蒸发,作为冷却介质的水被不断浓缩,必须不时地添加化学阻垢剂,并把过分浓缩的高含盐水排掉,其耗水量占到循环总量的2%~5%,并且会对环境造成污染;二是水容易被空气污染,也容易寄生微生物,堵塞管路,需要经常投放化学药剂;三是高含盐量及含氧量的水易造成管路及设备的腐蚀,严重的可导致停产。

密闭式冷却循环系统则完全解决了上述问题,由于循环水不与大气直接接触,其热交换是通过风-水或水-水换热系统完成的。这种方式比敞开式系统换热的效率高得多,再加上它几乎不消耗循环水,可以采用去离子、软化等方法对循环水进行处理,以避免设备腐蚀,并消除了敞开式系统对环境可能造成的影响,因此得到日益广泛的应用。目前的发展趋势是利用具有良好导热性的绝缘材料制造散热器,以便用普通水对电子装置进行循环冷却。

## 3.3.2 液体冷却的设备

### 3.3.2.1 泵的选择

(1) 常用的泵 泵是用来输送冷却液体并使其在冷却系统中循环的一个动力装置,常用的泵有离心泵、轴流泵和齿轮泵等。

① 离心泵。离心泵的特点是流量不固定,可在管路系统中装调节阀或调节扎来控制其流量大小,而不会使电动机过载。此外也可对离心泵的电动机进行速度控制,调节流量和压力。离心泵的缺点是在启动时容易被空气封住而抽不上液体。因此,安装时要注意将泵装在液面以下,使泵的入口处始终充满液体。

② 轴流泵。轴流泵的特点是流量比离心泵大,压力低,其特性与离心泵类似。

③ 齿轮泵。齿轮泵是一种定量泵,其尺寸小、重量轻、压力大且效率高,不会被空气封死。由于流量不变,节制这种泵时会使马达的负载和压力增加,因此不能减小流量。

#### (2) 泵的选择注意事项

① 泵的特性、流量和压力。流量可根据发热元器件(或设备)的需要来定,压力可根据冷却系统中液体所经过的各电子组件、换热器、管道的压力损失来定。

② 冷却液体的物理特性和化学特性对泵体的适应性,如密度、黏度、温度、悬浮物质、热稳定性以及对泵体结构材料的腐蚀性与溶解度。

- ③ 泵用电机的合理选择, 包括电动机的电气噪声及机械噪声。
- ④ 特殊使用的特性, 如空用设备要求重量轻、体积小、功率低及维修方便等。
- ⑤ 成本和工作可靠性。

### 3.3.2.2 热交换器

电子设备中常用的热交换器有下列几种:

#### 1. 列管间壁式热交换器

列管间壁式热交换器的结构是多种多样的, 冷流体在管内流动, 热流体在管外流动(或绕流), 两种流体在壁面上进行热交换。根据管内外冷、热流体流向的不同, 此类热交换器可分为顺流、逆流、叉流和往复流四种, 如图 3-22 所示。

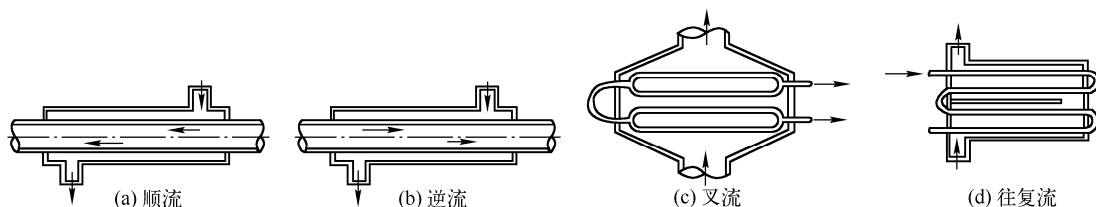


图 3-22 列管间壁式热交换器

#### 2. 紧凑式热交换器

紧凑式热交换器可分为螺旋板式、内肋片式和板翅式等几种, 图 3-23 所示是电子设备中常用的两种结构形式。板翅式热交换器的特点是传热系数高、结构紧凑、重量轻和经济性好, 但阻力较大。

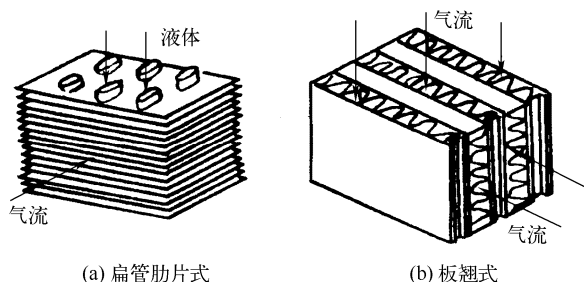


图 3-23 紧凑式热交换器

#### 3. 冷板

冷板是一种单流体的热交换器, 如图 3-24 所示。其中, 图 (a) 为扁管式冷板, 它由两块金属平板在相应的位置上冲压成凹槽, 再用滚焊将两板焊成一个整体, 两凹槽对接在一起, 形成冷却液体流通的通道, 通道的形状可根据需要而定, 可以是圆的、方的或椭圆的, 等等。通道的布设可根据发热元件的位置及散热的要求进行设计, 冷板的其余部分可作为安装元件用的底板。利用这种冷板式间接液体冷却可使结构做得非常紧凑。图 (b) 是板翅式冷板, 可以用作大功率器件和印制板组装件及高密度组装件的冷却装置。ATR 机箱两侧风冷冷板和相控阵雷达固态收发组件用的冷板均属此类结构。

冷板传热系数高的原因在于: 具有扩展的表面结构; 冷板通道的当量直径较小; 采用有利于增强对流换热的肋表面几何形状。

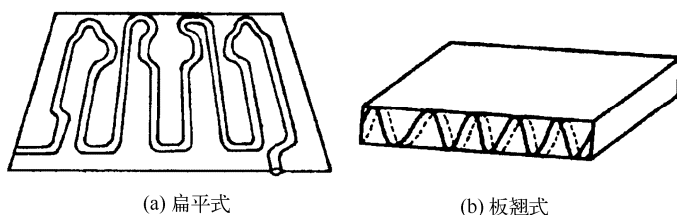


图 3-24 冷板结构

### 3.3.2.3 冷却剂

#### 1. 电子设备冷却剂的特性

- (1) 冷却液的热特性 包括导热系数、比热、密度、黏度、膨胀系数、表面张力等。
- (2) 物理特性 使用冷却液的方便性和安全性，包括适当的沸点和冰点。对密封设备，要求冷却液的表面张力低一些。选择尽量高的燃点和自燃温度，以及尽可能低的易燃性。
- (3) 电气特性 包括介电强度、体积电阻率、介电常数和损耗因数等。
- (4) 相容性 与元件的相容性要好，不产生化学反应，热稳定性要好，不易挥发。
- (5) 经济性 成本要低。

由于传热是一个复杂的过程，涉及的因素又如此之多，因此难以找到单项评价标准来比较各种冷却液体的冷却效果。但可以找出某种特定工作条件下影响传热的主要标准，并可作为一般指导原则。

#### 2. 直接液体冷却液

由于冷却液要与电子元件直接接触，所以液体必须具有高稳定性。同时，在工作温度范围内要具有不易挥发、不发生相态变化等性能。除按照上述评价标准考虑外，还应注意液体对电气性能、机械性能的影响。

目前用于直接冷却的冷却液有硅有机油、变压器油、去离子蒸馏水、氟化液以及一些碳氢化合物等。挥发性很大的液体不宜作为冷却液，因为在热源周围易被蒸汽罩住，形成很大的气膜热阻，对散热不利。

#### 3. 间接液体冷却的冷却液

衡量是否适宜于做间接液体冷却液的两个主要因素是腐蚀性和热特性。由于冷却液不与电子元器件直接接触，对电性能没有影响。

水是最经济有效的冷却液。为防止水对管道的腐蚀，可在水中加缓蚀剂；为防止水中矿物质在管道中生成水垢，可采用磁化水或去离子（钙离子、镁离子、钠离子）的蒸馏水等。

## 3.4 热电制冷与热管散热技术

### 3.4.1 热电制冷技术

热电制冷（半导体制冷）是一门介于制冷技术和半导体技术边缘的学科，它是利用塞贝克效应（Seebeck Effect）的逆效应珀尔帖效应（Peltier Effect）达到制冷目的的。

半导体制冷的发展大致经历了三个阶段：第一阶段是 20 世纪初，塞克尔和珀尔帖先后发现温差电流现象和温度反常现象，并进行了热电发电和热电制冷的研究。但当时由于使用的金属材料的热电性能较差，能量转换的效率很低，热电效应没有得到实质应用。第二阶段是 20 世纪 50

年代初期,主要是通过半导体材料的广泛应用,发现半导体材料具有良好的热电性能,并使热电效应的效率大大提高,从而使热电发电和热电制冷进入工程实践阶段。第三阶段是20世纪80年代以后,主要是通过各种途径努力提高半导体的热电制冷的性能,进一步提高热电制冷的应用领域。

### 3.4.1.1 热电制冷的基本原理

根据量子理论,金属与半导体材料具有不同的能级、不同的接触电位差和不同的载荷体。如图3-25所示,P型半导体与N型半导体之间用金属板连接,另一端通过金属板构成图中的电路,当合上开关S时,就会有图中的电流通过PN结,这样就会在半导体与金属板相连的上端形成珀尔帖冷效应,下端形成珀尔帖热效应。由于在制冷过程中冷端会从环境中吸收一部分热量即珀尔帖热 $Q_p$ ,但是同时也会有焦耳热 $Q_J$ 和傅里叶热 $Q_F$ 的产生,这两种热量都会使冷端在放热的同时吸热,所以导致真正的制冷量 $Q_0$ (即从冷端真正吸收的热量)是很低的。

$$Q_0 = Q_p - \frac{Q_J}{2} - Q_F \quad (3-8)$$

从冷端吸收的热量 $Q_0$ 加上消耗的电能便是向热端的放热量 $Q_H$ 。

### 3.4.1.2 热电制冷器的结构设计

图3-26为热电制冷器的结构示意图。导电接片一般用导电性能好的紫铜片制成。考虑到与N、P型半导体的焊接性能,可在紫铜片上镀镍,然后镀锌。接片的厚度为0.3~0.5mm。

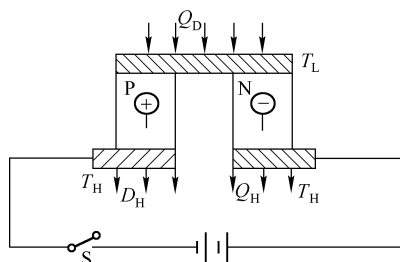


图 3-25 热电制冷的基本原理

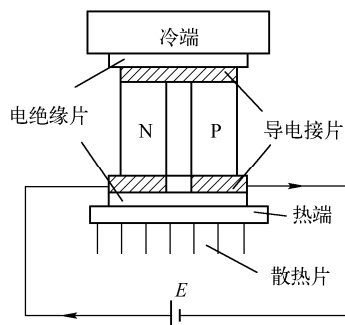


图 3-26 热电制冷器的结构示意图

要求电绝缘片既能起到电绝缘作用,又有良好的导热性能。垫片一般用铝陶瓷材料制成,厚度为0.5~0.8mm。

单级制冷器的温差约为50~60℃。为了获得更低的温度和更大的制冷量,通常采取多级制冷器串联、并联或混联。通常热电器件的级数为2~3级,每级可由10个、20个或30个电偶堆组成;目前最多的达8级,当热端温度保持在50℃时,冷端温度为145K(-128℃)。

串联型多级热电器件的组装应使各级的工作电流相等,级与级之间用电绝缘片隔开。为使温差损失较小,通常将下一级电偶对断开,使N型半导体的冷端与上一级N型半导体的热端相接,P型半导体的冷端与上一级P型半导体的热端相接。

### 3.4.1.3 热电制冷装置的特点

(1) 可以采用直流电源,并以改变电流方向的方法达到加热或制冷的目的。用于加热时的效率可大于1。

- (2) 无运转部件，故可靠性高。
- (3) 对重力不敏感。
- (4) 制冷的速度和温度可通过工作电流进行控制。
- (5) 装置的尺寸不受限制，可根据设备的制冷要求进行组装。

(6) 热电制冷装置的主要缺点是工作效率较低，尤其是需要采用大电流的直流电源，其体积和重量较大；其制冷温度也比不上机械式制冷机低。因此仅适用于制冷量小、制冷温度不太低的电子器件冷却或作为恒温器使用。

### 3.4.2 热管散热技术

1963 年美国 Los Alamos 国家实验室的 G.M.Grover 发明了热管，它是一种高效的传热元件，具有优异的传热特性，沿轴向的等温特性好。其传热效率高，比同质量的铜散热器大 2~3 个数量级。热管散热是一种利用相变过程中要吸收/散发热量的性质来进行冷却的技术。

#### 3.4.2.1 热管散热原理

热管是一个密封焊的蒸发冷却器件，其结构如图 3-27 所示，由密封管、吸液芯和蒸汽通道组成。其中吸液芯由多孔物质组成，或在管壳内壁开沟槽装设通道管（液相工质专用小阻力通道）；其原理是靠毛细作用使液相工质由冷凝段回流到蒸发段，并使液相工质在蒸发段沿径向均匀分布。制造时，管内抽成负压后充以适量的可以汽化的工作液体（如水、乙醇、氟利昂等），使紧贴管内壁的吸液芯毛细多孔材料中充满液体，并加以密封。从轴向看，管的一端为蒸发段（加热段），另一端为冷凝段（冷却段），中间为绝热段。工作时外部热源的热量传至蒸发段，通过热传导使工质的温度上升，进一步导致液相介质吸热蒸发。液体的饱和蒸汽压随着温度上升而升高，从而使蒸汽经蒸气通道流向低压部分，即流向温度较低的冷凝段。蒸汽在该段冷凝，放出的热量通过充满工质的吸液芯和管壁的热传导，由管子的外表面传给冷源。此后冷凝液体可以在没有任何外加动力的条件下，借助管内的毛细吸液芯所产生的毛细力回到加热段继续吸热蒸发，如此循环，达到热量从一处传输到另一处的目的。

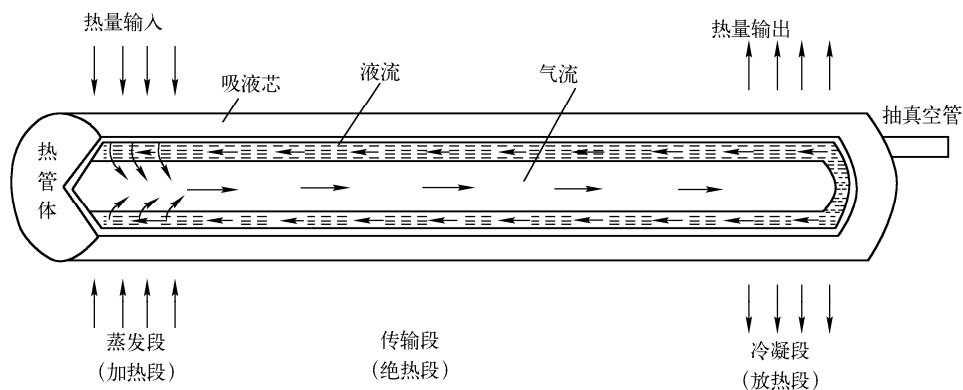


图 3-27 热管的结构

由于液态介质的蒸发潜热大，同时蒸汽的流动阻力小，所以能够在温差较小的蒸发端至冷凝端间传送大量热量，即热管冷却装置的有效导热系数非常大，具有良好的冷却效果。此外，由于热管是一个所谓“自治”的系统，它利用蒸发和毛细现象进行介质循环，不需要借助泵等外力，所以免除了采用风机等旋转部件。运行时没有噪声，且具有很高的可靠性。因此，自 20 世纪 60



年代以来,在包括大功率半导体器件的冷却在内的许多领域得到了应用,各大电子装置制造商也均对其给予了相当大的关注。比如,西门子公司就曾经在20世纪70年代尝试过利用热管冷却的平板型晶闸管,并取得了良好的效果。由于高压大功率装置的热管冷却系统还必须提供高压阀体所需的电绝缘,所以氟利昂通常成为首选的冷却介质。但氟利昂可能对环境造成不良影响。

### 3.4.2.2 热管的类型

#### 1. 按其工作温度范围分

(1) 深冷热管 其工作温度范围为  $100\sim 200\text{K}$ 。工质可选用纯化学元素,如氢、氦、氮、氧等,或乙烷、氟利昂的化合物。

(2) 低温热管 其工作温度范围为  $200\sim 250\text{K}$ 。工质可选用水、氟利昂、氨、酒精、丙酮等有机物质。

(3) 中温热管 其工作温度范围为  $550\sim 750\text{K}$ 。工质可选用导热姆 A (联苯-苯醚共溶体)、水银、硫、铯等物质。

(4) 高温热管 其工作温度范围大于  $750\text{K}$ 。工质可选用钾、锂、铝、银等高熔点液态金属。

#### 2. 按毛细结构分

液体冷凝的过程会用到毛细原理,因此毛细结构是一根合格热管产品的核心。它主要有三个作用:一是提供冷凝端液体回流蒸发端的通道;二是提供内壁与液体/蒸汽进行热传导的通道;三是提供液气产生毛细压力所必需的孔隙。毛细结构分为四种:丝网、沟槽、粉末烧结和纤维四种。在 PC 散热器上,大部分都是沟槽与粉末烧结两类结构,POWDER (烧结热管) 占 80%; GROOVE (沟槽热管) 占 20%。

烧结式热管,其毛细结构是通过高温下铜粉烧结制造而成的。最常见的水介质烧结式热管制造流程大致为:选取 99.5%纯度的铜粉,铜粉单体粒径控制在  $75\sim 150\mu\text{m}$ 。使用工具将外径 5mm 红铜管内部清除干净,去除毛刺,接着将铜管放到稀硫酸中使用超声波清洗。清洗干净之后将得到一根内外壁皆十分光滑、无氧化物的铜管。此时将一根细钢棍插到铜管里(需要工具精确地将钢棍儿固定在铜管的中央,以方便铜粉均匀填充),将铜管底部用铜片暂时封闭。接着就可以把纯铜粉倒入铜管了。装填完毕之后就可以拿到烧结炉进行烧结。在烧结过程中,温度的把控也很重要。烧结完成之后使用一个辅助工具把铜管加紧,使用工具把钢棍抽出即可。

严格按照上述流程制造的烧结式热管,每个部分的毛细结构渗透率都应该大致相同,铜粉烧结块分布厚度大致均匀。拆开热管仔细观察,就可以发现该热管的烧结工艺是否过关。

沟槽式热管是热管毛细结构中制造比较简单的一种,采用整体成型工艺制造,成本是一般烧结式热管的  $2/3$ 。沟槽式热管生产方便,但缺点十分明显。沟槽式热管对沟槽深度和宽度要求很高,而且其方向性很强。当热管出现大弯折时,沟槽式方向性的特性就成了致命缺点,导致导热性能大幅度下跌。

### 3.4.2.3 热管设计

#### 1. 设计技术要求

(1) 工作温度。根据电子设备器件及整机的温度控制要求,热管的工作温度范围一般为  $-50\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。个别器件,如调速管的集电极许用温度可达  $270^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 传热量。根据器件的耗散功率和工作环境条件确定热管所需传递的功率(由几毫瓦至几十千瓦)。

(3) 热特性。按电子器件耗散功率的大小以及温度控制的要求——均温、恒温或控温，来设计蒸发端、冷凝端、吸液芯和管壳的几何形状及尺寸。

(4) 工作环境。根据电子设备的工作环境条件（地面、海上或航空等）来估计重力场对热管工作的影响，同时确定冷凝端与冷却介质的连接方式。

(5) 结构尺寸。用户提供的热管外形、尺寸及重量等指标要求。

## 2. 管壳材料的选用

要求与工质相容、湿润性良好、导热系数高、有足够的机械强度和良好的加工性能。适合于电子设备热管用的管壳材料主要有紫铜无氧铜、铝合金、不锈钢等。

## 3. 管壳结构

### (1) 热管的直径

以热管长度均为 150mm 计算，直径为 3mm 的热管其热阻值为 0.33。而直径为 5mm 的时候，热阻立刻降到了 0.11，已经可以满足绝大部分场合对导热的要求了。而当热管直径扩大到 8mm 的时候，热阻竟然达到了 0.0625，这是大部分金属材质散热器难以企及的热阻。

不同直径的热管，最大导热量区别有多大呢？直径为 3mm 的正品热管，2.8 个标准热传递周期中只能传递 15W（15J/s）的热量；而直径为 5mm 的热管，在 1.8 个热传递周期最大热量传递达到了 45W，是 3mm 热管的 3 倍。而 8mm 的热管产品只需 0.6 个周期就可以传递高达 80W 的热量。如此高的传热量，如果没有良好的散热片设计和风扇配合，很容易导致热量无法正常发散。

### (2) 热管的弯曲

热管直通的状态下具有最好的热传递效能。但是在实际使用中，热管经常要被弯曲。弯曲后的热传递性能会出现不同程度下降，这也与工艺好坏有密切联系。在弯曲部位要尽量保持直径无变化，或是变化很小。如果出现严重形变，比如本来圆柱形的外壁变成扁平形状，则会大幅降低热传导性能，因为过大的形变会导致热管内部的毛细结构部分中断。

沟槽热管在这方面非常敏感，当沟槽管弯曲 90°，导热性能大幅下降，甚至只能达到原来性能的 1/2。部分采用沟槽管的散热器甚至将其弯曲 180°，那样的效果可想而知了。而烧结式热管在弯曲时的敏感度就小多了，虽然弯曲后性能也会有部分下降，但是并不明显。

当热源与冷却装置需要进行相对移动时，通常在绝热端做成便于弯曲的波纹金属管，而蒸发端和冷凝端均为刚性结构。

### (3) 热管的形状

① 用光管或在圆管内壁加工成轴向槽或周向螺纹槽。轴向槽的宽度取 0.5~0.8mm，槽深 0.5~1.2mm，槽数为 20~30 个/cm；周向螺纹槽的宽度取 0.15mm，槽深 0.15mm，槽数 20~30 个/cm。

② 同心圆筒组成径向热管。

③ 小功率电子器件或集成电路用的热管管壳可设计成扁平结构。

## 4. 管壳强度校核

由于各种管壳需要承受工质蒸发时所产生的蒸汽压力（例如，水在 200℃时，蒸汽压力可达 1.52MPa；氨在 40℃时可达 15.1MPa），因此需对管壳的强度进行校核，以保证热管安全地工作。圆形热管管壁的厚度  $\delta$  为

$$\delta = \frac{pd_i}{2\sigma} \quad (3-9)$$

式中  $p$  为最高饱和蒸气压力（Pa）； $d_i$  为圆形管内径（m）； $\sigma$  为管壳材料的许用压力（Pa）。

#### 3.4.2.4 工质和吸液芯的选择

##### 1. 工质选择

- (1) 工质与管壳材料及吸液芯应相容，对热管的安全工作和可靠性不产生有害的影响。
- (2) 工质的工作温度范围可选在工质的凝固点与临界温度之间，一般以接近工质的沸点为宜。
- (3) 工质的品质因数高。
- (4) 重力场条件下的热管，工质的选用应计及毛细力的提升高度。
- (5) 选用的工质无毒、不易爆、使用安全。某些器件（如行波管）用的工质还应具有良好的电绝缘性能。

##### 2. 吸液芯的选择

吸液芯提供足够的毛细泵力将液体均匀分布在蒸发端上。选择要求是：

- (1) 吸液芯要有足够的毛细泵力。
- (2) 具有较高的渗透率。
- (3) 吸液芯的传热特性好。
- (4) 吸液芯具有足够的刚性，以保证它与管壁的紧密接触。
- (5) 制造简单、可靠、经济性好。

## 第4章 电子设备防腐蚀设计

腐蚀通常是经由一段时间酝酿，当损害的现象较为显著时，才会引起人们的注意，而等到破坏造成时，结果却往往非常严重。据估计，在美国每年因为腐蚀所造成的直接损失，就约占国民生产总值的4%。在我国，除了桥梁、建筑等公共工程因腐蚀致使用寿命降低之外，近年来在航空器及其他方面，因腐蚀造成的安全危害、资源及环境破坏引起的损失，无法估计，丝毫不逊于其他破坏所造成的损失。

现代电子设备密集的装配、高阻抗的电路以及很高的放大倍数等因素都使电子元器件对表面腐蚀更为敏感，这是从未有过的，也使防腐蚀设计变得更加重要。本章所讨论的腐蚀防护设计的范围，包括金属材料腐蚀、高分子材料老化和微生物腐蚀三部分。

### 4.1 电子设备防腐蚀基础

#### 4.1.1 腐蚀效应及环境因素

##### 4.1.1.1 腐蚀效应

一种材料所以无法再使用，除了因为于强度无法承受负荷所产生的破坏，还有磨损、腐蚀、辐射损伤等其他因素，而这其中又以腐蚀的伤害最大，影响也最严重。材料受环境介质的化学作用而发生性能下降、状态改变，直至损坏、变质，这就是腐蚀。现已发现，几乎所有材料（金属和非金属材料）在使用过程中，由于受环境作用都会发生腐蚀。

##### 1. 金属腐蚀

金属与周围环境介质之间发生化学或电化学反应，而引起的破坏或变质称为金属腐蚀。按腐蚀机理分可主要分为化学腐蚀和电化学腐蚀。

化学腐蚀，主要为金属在无水的液体和气体以及在干燥气体中的腐蚀。在干燥的空气中，金属与氧作用形成表面氧化膜层，可列入化学腐蚀范围。

电化学腐蚀，是指金属表面与离子导电介质发生电化学反应引起的破坏。金属材料在潮湿的大气、海水、土壤等自然环境及在酸、碱、盐溶液和水介质中的腐蚀都属于电化学腐蚀。电化学腐蚀是最普遍、最常见的金属腐蚀。在造成电子装备故障的常见原因中，金属的电化学腐蚀是最常受到指责的因素。大多数电子设备的制造、运输、储存和使用都是在地面或接近地面的地方进行，因此金属材料在潮湿大气中的腐蚀破坏是电子设备防腐蚀设计重点考虑的问题。

##### 2. 非金属腐蚀

非金属材料在化学介质或化学介质与其他因素（如应力、光、热等）共同作用下，因变质而丧失使用性能称为非金属材料腐蚀。电子设备使用的非金属材料，以有机高分子材料为最广泛，如塑料、涂料、薄膜、绝缘材料等。高分子材料腐蚀的主要形式有老化、化学裂解、溶解、应力开裂等。高分子材料在一般大气环境中的老化是电子设备中常见的腐蚀现象。高分子材料不导电，

也不以离子形式溶解,其腐蚀过程难以用电化学规律阐明。

金属的腐蚀过程大多在金属表面发生,但高分子材料不同,其周围的腐蚀介质(气体、蒸汽、液体等)向材料内部渗透、扩散是腐蚀的主要原因。

### 3. 生物腐蚀

由于生物活动而引起材料变质破坏的现象通常称为生物腐蚀,其中由于霉菌和其他微生物引起的腐蚀称为霉变。对于电子设备,尤其是对微电子设备,霉变导致绝缘材料的绝缘性能下降、印刷电路或细微金属导线的短路等,可导致严重故障。因此,防霉变设计也是电子设备环境防护设计中不可忽视的一项内容。

应该强调指出的是,由于电子元器件的微型化和密集组装,使一些腐蚀现象往往用肉眼难以观察到,但其微弱的腐蚀程度和微量的腐蚀产物可引起强烈的腐蚀效应。例如,沾附在继电器触点上的腐蚀物可以引起导通失效;铜、银导电器件表面生成的氧化膜或硫化膜使其电导率发生极大变化;光学透镜发霉后形成雾状蚀斑等。

#### 4.1.1.2 腐蚀性环境因素

凡是能够作为腐蚀介质引起材料腐蚀的环境因素,都可称为腐蚀性环境因素,主要有以下几种。

##### 1. 水分

无论是以湿气、蒸汽还是液体水的形式存在的水分,都是最基本的腐蚀介质。它侵蚀金属和非金属,还帮助微生物生长。水分来自降水(雨、雪、冰、霜、雾)、自然水(江、河、湖、海)、冷凝水、潮湿空气等。

##### 2. 氧和臭氧

空气和水中的氧和臭氧是加速高分子材料老化的主要因素。

##### 3. 温度

高温增加材料的化学活性,化学反应的速度一般都按温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$  而增加一倍的规律加速。因此,温度升高,腐蚀速度加快。温度与湿度的效应是并存的,温度下降引起相对湿度升高,有可能发生凝水。

##### 4. 腐蚀性气体

二氧化硫、硫化氢、氧化氮、氯、氯化氢、氨、有机酸气体等都会引起材料腐蚀。这些气体来自工业大气和某些高分子材料的释放。

##### 5. 盐雾

大气中的盐雾是悬浮的氯化物和微小液滴所组成的一种气溶胶状体。大气中的盐雾主要出现在海上和沿海地区,也出现在盐碱地区的空中。海水中,海浪不断相互撞击和拍击海岸,产生大量泡沫,这些泡沫被气流撕成细小液滴飘向空中,经过裂解、蒸发、混并等复杂过程,成为一种弥散系统。内陆盐碱地区的含盐泥土被风刮起并粉碎成尘埃飘向空中,经过复杂的过程也形成盐雾。

盐雾的成分主要是  $\text{NaCl}$  (77.8%) 和  $\text{MgCl}_2$  (10.9%), 其余为少量的  $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4$  和其他杂质等。当相对湿度大于 65% 时,任何物体表面均附着有  $0.001\sim 0.01\mu\text{m}$  的水膜,而盐雾中的  $\text{NaCl}$  和  $\text{MgCl}_2$  的显著特点是能从相对干燥的大气中吸附多量水分,尤其在高温高湿的条件下,当物体表面附着这些含盐水分时就会长期保持潮湿状态,由于含盐水膜的附着,就加速了金属材料的腐蚀,也降低了电子设备绝缘材料的表面电阻。如果被吸收,则降低体积电阻。

##### 6. 沙和灰尘

灰尘往往在工业区出现,其中含有大量焦油产物、灰粉及煤烟。沙尘指风带起的粉末状的沙

子。沙和灰尘是高度吸湿的，落在电子元件表面上，能保持潮湿，其中可溶性物质溶于水分中形成电解液。火山区的灰尘含有硫，对许多材料都有很大的腐蚀性。

#### 7. 太阳辐射

有机化合物和合成材料最易受阳光影响而老化变质。在地球上，最大的太阳辐射发生在热带和赤道区。但在温带区，太阳辐射热和光化学的综合效应仍然有很大的损害性。在我国，最大的太阳辐射出现在西部高原地带。

#### 8. 微生物和动物

微生物和动物这是生物性环境因素，主要指霉菌和一些对材料和设备有破坏作用的昆虫、鼠类及鸟类。它们的生存活动与气候条件有密切关系。

在一个具体的环境中，通常是同时存在几种环境因素，因此，要考虑各种环境因素的综合作用。在沙漠气候环境，高温（日间）、太阳辐射、沙尘是主要因素。在热带湿热条件，高温加剧了湿度、盐雾的作用以及有利于霉菌的生长（在某个温度范围）。

环境条件中的机械性因素（振动、冲击、加速度等）和电磁性因素（磁场、电压等），如果单独出现并不引起腐蚀性损害。当这些因素与腐蚀性因素共同作用时，则能够增大腐蚀程度。举一个明显的例子，在腐蚀介质与拉伸应力共同作用下，金属材料有可能发生应力腐蚀破裂，这是一种后果十分严重的局部腐蚀现象。

### 4.1.2 材料耐蚀性及防腐要求

#### 4.1.2.1 黑色金属及其合金耐蚀性

金属材料的化学性能最主要的是指它的耐腐蚀性。材料抵抗周围介质对腐蚀破坏的能力称为材料的耐腐蚀性能。耐蚀性不是材料固有不变的特性，它随材料的工作条件而改变。

##### 1. 碳钢和普通铸铁的耐蚀性

碳钢和普通铸铁在淡水、大气、土壤、海水等中性介质中都不耐蚀；在各类干燥气体和有机溶剂等介质中耐蚀性良好；在低浓度碱溶液及浓硫酸、浓氢氟酸等介质中，碳钢和普通铸铁表面能生成稳定的膜，因而是耐蚀的。

影响耐蚀性的因素有介质组成、铁碳合金的成分和组织以及钢铁热处理条件的差异。

##### 2. 耐蚀合金铸铁

在铸铁中加入某些合金元素可以大大提高它在一些介质中的耐蚀性。如添加硅、铬、铝等元素，可使铸铁表面形成连续、致密、牢固的表面膜；添加镍，能获得耐碱性介质腐蚀性能优良的奥氏体铸铁；加稀土元素、镁，能使石墨球化，从而大大改善高硅铸铁的力学性能和工艺性能。

##### 3. 耐蚀低合金钢

耐蚀低合金钢，通常是指在碳钢中加入总量低于 3% 左右的合金元素的合金。加入的合金元素种类、含量不同，所起的作用也不同。根据在不同介质中的耐腐蚀性能，可将耐蚀低合金钢分为耐大气腐蚀钢种、耐海水腐蚀钢种和耐硫化氢腐蚀钢种。

##### 4. 不锈钢的耐蚀性

不锈钢是铬、镍含量较高的合金钢。通常把耐大气腐蚀的合金钢称为不锈钢，把在酸中及其他强腐蚀性介质中耐腐蚀的合金钢称为耐酸钢。一般把上述不锈钢与耐酸钢统称为不锈钢耐酸钢或简称为不锈钢。

###### (1) 铬 13 不锈钢

铬 13 不锈钢含铬 12%~14%，约为不锈钢必需含铬的最低量（Cr 含量>12%）。它可经热处理硬化，产生带磁性的马氏体结构，所以通称马氏体不锈钢。

它的耐蚀性和其他不锈钢类似。能够耐大气、水、硝酸、碱、盐、有机酸、有机化合物及其他氧化性环境的腐蚀；不耐非氧化性酸（硫酸、盐酸等）的腐蚀。在含有卤素离子的溶液中可产生孔蚀和应力腐蚀破裂。由于它不含镍，铬含量也较低，所以一般耐蚀性都低于铬 17 铁素体和铬 18 镍 9 奥氏体不锈钢。

它的强度和硬度高，韧性较低，常用于同时需要耐蚀性、强度和硬度的部件，如阀门部件、球轴承等。一般不用作槽、管等化工设备。

#### （2）铬 17 不锈钢

铬 17 不锈钢含铬 17%~27%，晶粒结构主要是带磁性的铁素体，所以通称铁素体不锈钢。它不能经热处理硬化，但可通过冷加工硬化。

它的耐蚀性和其他不锈钢类似，耐大气性能优良，耐硝酸和其他氧化性环境，也耐碱、盐、水、有机酸及其他有机化合物的腐蚀。不耐非氧化性酸（硫酸、盐酸等）的腐蚀。其耐蚀性优于马氏体不锈钢，低于奥氏体不锈钢，但在耐应力腐蚀破裂方面优于奥氏体不锈钢。

主要用于耐大气腐蚀的各类部件、家庭用具等，低碳含钛的钢对晶间腐蚀有较强的抵抗力。

#### （3）铬 18 镍 9 不锈钢

铬 18 镍 9 不锈钢（奥氏体）是含铬 11%以上或同时含镍的钢种的通称。它在常温氧化性环境（如大气、水、强氧化性酸等）中容易钝化，使表面产生一层以氧化铬为主，保护性很强的薄膜，其腐蚀率极低。但当温度增高或环境的氧化能力减小时，将由钝态变为活态，腐蚀显著增大。各类不锈钢对有机酸、有机化合物、碱、中性溶液和多种气体都有良好耐蚀性。在非氧化性酸（硫酸、盐酸等）中腐蚀严重。不锈钢设备的腐蚀常常为局部腐蚀，当处于钝态和活态边缘，在含有卤素离子的盐溶液中，可能产生孔蚀。在含有对应应力腐蚀敏感离子的溶液中，受应力的部分（如焊缝附近）则可能产生危险的应力腐蚀破裂。焊缝两侧的敏化区还易产生晶间腐蚀。

铬镍钢的耐蚀性和机械性能都超过单纯铬钢。镍的加入促进奥氏体结构的生成，可得到更好的机械性能，特别是使韧性提高，同时又增大了钝化范围，使它更容易钝化。铬 18 镍 9 钢是不锈钢中用途最广的品种。它没有磁性，不能经热处理硬化，但和铁素体不锈钢一样，可经冷加工硬化。

加入少量钛或铌的品种对晶间腐蚀的抗力较高，也称“稳定钢”。铬、镍含量越高，耐蚀性和耐热性也越高，如铬 25 镍 20 钢就具有耐高温氧化的特点。

#### （4）铬 18 镍 12 钼（钛）不锈钢

铬 18 镍 12 钼（钛）不锈钢和一般铬镍不锈钢相似，由于加入了 2%~4%的钼，所以在许多方面比铬镍不锈钢更为优越，特别是在非氧化性酸和热的有机酸、氯化物中的耐蚀性要比铬镍不锈钢好得多，抗孔蚀的能力也好。

#### （5）铬 20 镍 22~30 不锈钢（20 号合金）

铬 20 镍 22~30 不锈钢，国外商品名为 Durime 20（铸材）和 Carpehter 20（锻材）。因铬、镍含量较高，所以耐蚀性比普通不锈钢更高。可用于处理硫酸、硝酸、磷酸、混酸、亚硫酸、有机酸、碱、盐溶液、硫化氢等。在某些浓度下，还可用于高温，但不耐浓或热的盐酸和湿的氟、氯、溴、碘、王水等的腐蚀。

不同牌号的钢种由于合金成分略有差异，在个别环境中耐蚀性可能有差别，使用时要注意。

#### 4.1.2.2 有色金属及其合金耐蚀性

工业上钢铁称为黑色金属，除钢铁以外的金属称为有色金属。有色金属及其合金具有良好的耐腐蚀性和低温性能。

##### 1. 铜及其合金

铜及其合金具有高的导电性、导热性、塑性、冷韧性，并且在许多介质中具有高的耐蚀性能。

###### (1) 纯铜

纯铜也称紫铜。铜在一般大气、工业大气、海洋性大气中、比较稳定，在碱中、在弱的和中等浓度的非氧化性酸中也相当稳定，若溶液中有氧或氧化剂存在，腐蚀将会非常严重。铜不耐硫化物（如  $H_2S$ ）腐蚀。铜具有高的导电性、导热性、塑性和良好的加工性能，另外，铜具有良好的冷韧性。但铜的强度低，铸造性能不好，且在某些介质中的耐蚀性不高，很少用作结构材料。

###### (2) 铜合金

常用的铜合金有黄铜和青铜。

① 黄铜。铜与锌组成的合金称为黄铜。为改善其性能，常加入锡、铝、硅、镍、锰、铅、铁等元素，这样形成的合金称为特殊黄铜。

特点：机械性能与含锌量有着极为密切的关系，铸造性能很好、抗蚀性较好。含锌量大于 20% 的黄铜经冷加工后，在潮湿的大气、海水、高温高压水、蒸汽及一切含氨的环境中都可引起应力腐蚀断裂。黄铜在中性溶液、海水和在退火后酸性溶液中易发生脱锌腐蚀，可在黄铜中加入 0.02% 的砷防止其发生。

② 青铜。凡是铜合金中的主加元素不是锌而是锡、铝、硅等其他元素者，通称为青铜。常用的青铜有锡青铜、铝青铜和硅青铜等。

特点：锡青铜铸造性能较黄铜差，抗腐蚀性比纯铜和黄铜更好，但对酸类的抗蚀性较差。铝青铜的机械性能也比黄铜和锡青铜高，而且在大气、海水、碳酸及大多数有机酸中具有比黄铜和锡青铜更高的耐蚀性。硅青铜具有比锡青铜高的机械性能和较低的价格，而且铸造性能和冷、热压力加工性能都很好。

##### 2. 铝及其合金

###### (1) 铝

铝的密度小，密度为  $2.7g/cm^3$ ，约为铜的 1/3；其导电性、导热性、塑性、冷韧性都好，但强度低，经冷变形后强度可提高；能承受各种压力加工。铝是电极电位很负的元素，铝在强氧化性介质以及在氧化性酸（如硝酸）中也是稳定的。卤素离子对铝的氧化膜有破坏作用，所以铝在氢氟酸、盐酸、海水和其他含卤素离子的溶液中是不耐蚀的。

广泛用于制造反应器、热交换器、冷却器、泵、阀、管件等。

###### (2) 铝合金

纯铝的强度较低，若在铝中加入一些元素，如铜、镁、锌、锰、硅等形成铝合金，其性能将会有很大的改善。

##### 3. 钛及其合金

###### (1) 纯钛

纯钛有很好的钝化性能，钝化膜很稳定，在许多环境中表现出很好的耐蚀性，有“耐海水腐蚀之王”之称。高温下，钛的化学活性很高，能与卤素、氧、氮、碳、硫等元素发生剧烈反应。钛一般不发生孔蚀；除在几种个别介质（如发烟硝酸、甲醇溶液）中，也不发生晶间腐蚀；钛的



应力腐蚀破裂敏感性小, 具有抗腐蚀疲劳的性能, 耐缝隙腐蚀性能良好。

#### (2) 钛合金

钛合金的机械性能与耐蚀性都比纯钛有明显提高。工业上使用的都是钛合金。钛合金的主要腐蚀形态是氢脆和应力腐蚀破裂。

### 4. 镍及其合金

#### (1) 镍

在各种温度、任何浓度的碱溶液和各种熔碱中, 镍具有特别高的耐蚀性。但镍在含硫气体、浓氨水和强烈充气氨溶液、含氧酸和盐酸等介质中, 耐蚀性很差。镍具有高强度、高塑性和冷韧的特性, 能压延成很薄的板和拉成细丝。镍很稀贵, 主要用于制造碱性介质设备, 以及铁离子在反应过程中会发生催化影响而不能采用不锈钢的那些过程设备。

#### (2) 镍合金

Ni-Cu 合金中的蒙乃尔合金具有很好的力学性能和机械性能, 易于压力加工和切削加工, 耐蚀性好。主要用于在高温荷载下工作的耐蚀零件和设备。Ni-Mo 合金中的哈氏合金能耐室温下所有浓度的盐酸和氢氟酸。Ni-Cr 合金中的因考尔合金, 在高温下具有很好的力学性能和很高的抗氧化能力, 是能抗热浓  $\text{MgCl}_2$  腐蚀的少数几种材料之一。

### 4.1.2.3 防腐蚀设计基本要求

#### 1. 防腐蚀设计应考虑的主要因素

采取恰当的防护措施, 腐蚀可受到一定程度的控制, 可以避免某些腐蚀事故。防腐蚀措施应该在电子设备的设计阶段确定。在进行防腐蚀设计时, 应该考虑的主要因素有:

- ① 电子设备可能遭遇的环境条件及主要的腐蚀性环境因素。
- ② 对腐蚀损坏最敏感的部位(包括元器件、零部件和材料)。
- ③ 要求保护的等级(临时性防护、可更换零件防护、稳定永久性防护等)以及允许采用的防护手段。

#### 2. 电子设备防腐蚀的基本方法

通过对各种因素的综合分析, 预测可能发生的腐蚀类型和危险性后果, 从而确定合理而有效的防腐蚀措施。防止电子设备腐蚀损坏的基本方法有以下五种:

- ① 采用高耐蚀性材料。
- ② 消除或减弱环境中的腐蚀性因素。
- ③ 对不耐蚀材料进行耐蚀性表面处理。
- ④ 防腐蚀结构设计。
- ⑤ 电化学保护。

企图采用一种方法来达到防止腐蚀的目的不切实际的。通常需要将几种方法结合起来使用, 以获得经济而有效的效果。

## 4.2 潮湿和盐雾的防护

### 4.2.1 潮湿的侵蚀及防护

#### 4.2.1.1 吸湿机理

空气中的潮湿是水在热的作用下蒸发形成的水蒸气, 随着温度的升高, 水蒸气逐渐增多直到

饱和状态。当水蒸气过饱和时，它将凝聚成小水滴。处在潮湿中的物体，由于空气中水蒸气的分子运动，必然有一部分水分子吸附在物体表面上，形成一层水膜，随着空气相对湿度的增高，水膜厚度也增大。当相对湿度达 65% 时，处于空气中的一切物体表面都会覆盖着一层  $0.001 \sim 0.01 \mu\text{m}$  的水膜；当相对湿度增大到 90% 时，水膜厚度可达  $10 \mu\text{m}$ 。一切物体的吸湿，都是由这层水膜引起的。物体的吸湿可以有以下四种形式。

#### (1) 扩散

在高湿环境中，由于物体内部和周围环境的水汽压力差较大，水分子在压力差的作用下，向物体内部扩散，使水分子进入物体内部。扩散随着温度升高而加剧。

#### (2) 吸收

有些材料本身具有缝隙和毛细孔，如高分子塑料的分子间均存在一定的空隙，纤维材料则有众多的毛细孔。当这种材料处于潮湿空气中时，材料表面的水膜分子由于毛吸作用，进入材料内部。

扩散和吸收使水分子进入材料内部，因而会使材料的电阻率下降。某些非金属材料分子间的亲和力小于对水分子的亲和力，当水分子进入材料内部时，将在材料内部产生溶解作用，使材料组织发生变化并开始膨胀。

水分子以扩散和吸收的形式进入物质内部的程度，可以用吸湿性（吸潮性）和透湿性等指标表征。吸湿性以材料在温度为  $20^\circ\text{C}$  和相对湿度为 100%（或 97%~100%）的空气中经过 24h 后所增加重量的百分数来表示。吸湿性与材料的表面性质有关。一般来说，材料表面有缝隙和毛细孔以及分子间有较大的空隙时，其吸湿性也较大。有时也可以用吸水性来表示材料吸湿的能力。吸水性以材料放在温度为  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$  的蒸馏水中经过 24h 后所增加重量的百分数来表示。吸湿性和吸水性具有相同的物理意义，只不过表示的方法不同而已。

透湿性指材料能被水蒸气（或水分子）透过的能力。透湿性用透湿率来表示，即在单位气压（mmHg）下，材料厚度为 1cm 时，每小时透过水蒸气的微克数，其单位为  $\mu\text{g}/\text{cm} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ 。透湿性与材料性质及密实程度有关。研究材料的透湿性对正确选择防潮保护涂层有重要的意义。金属和玻璃可认为不透湿（其透湿率为零），而石蜡、沥青、聚乙烯等材料透湿性都很小。

#### (3) 吸附

由于物体表面的分子对水分子具有吸引力，当物体处于潮湿空气中时，水分子就会吸附到物体表面上，形成一层水膜。含有碱及碱土金属离子、非金属化合物离子以及离子晶体化的固体材料，对水分子有较大的吸附能力。

#### (4) 凝露

当物体表面温度低于周围空气的露点时，空气中的水蒸气便会在物体表面上凝结成水珠，在物体表面形成一层很厚的水膜。在高温、低温交变循环下，可能造成材料内部的内凝露，严重时会使材料内部积水。

吸附和凝露会使材料表面形成一层水膜，因而使材料的表面电阻率下降。材料表面能否被水润湿，对材料表面的电阻率有很大影响。一般来说，材料表面被水润湿的程度越大，其表面电阻下降也越大。

亲水性的物体容易使水在其表面形成一层水膜，水膜使物体润湿，并使水沿着物体表面向内部渗入。憎水性物体使水在其表面上收缩成不相连的小水珠，物体表面不易被润湿，水分子也不易渗入物体内部。

扩散、吸收、吸附、凝露四种吸湿机理可能同时出现，也可能出现其中某一两种；凡是以这种方式吸湿的过程，都称为潮湿直接侵入，这是最基本的吸湿方式。此外，还有另一种吸湿方式，

即“呼吸”方式，它是指在温度交替变化和具有一定的气压差情况下，潮湿空气进入保护层、容器、软管及有缺陷的密封等过程。“呼吸”吸湿是一个在短时间内不易为人们所察觉的缓慢过程，对于要求较高的防潮密封，“呼吸”作用不容忽视。

#### 4.2.1.2 潮湿的侵蚀

潮湿、盐雾、霉菌以及气压、污染气体对电子设备影响很大，其中，潮湿的影响是最主要的。它有三个方面的侵蚀作用：物理的（溶胀、变化和最终分解）、机械的（破质或机械性能变化）、电气的（改变电气性能）。特别是在低温、高湿条件下，使空气湿度达到饱和而使机内元器件、印制电路板上产生凝露现象，使电性能下降、故障率上升。对库存设备、闲置设备或周期性停机（如一班制工作方式）设备的开机通电更容易发生不良现象。

湿气往往溶解氯化物、硫酸盐和硝酸盐等，能加速金属材料的锈蚀。潮湿还为霉菌的生长提供有利的条件，引起非金属材料霉烂。电子设备受到潮湿空气的侵蚀，会在元器件或材料表面凝聚一层水膜，并渗透到材料内部，从而造成绝缘材料表面的电导率增加，体积电阻率降低，介质损耗增加。潮气还能引起覆盖层起泡甚至脱落，使其失去保护作用。

非常低的湿度使密封和绝缘用的许多橡胶和有机材料干涸和皱缩，并显著改变其电气性能。高湿将造成水汽凝聚，设备的绝缘电阻降低，出现漏电和飞弧。在高密度的微电路中，湿气能形成导电通路，引起漏电或短路，造成损坏。元器件吸潮会使介电常数变化，介质损耗增大。例如，潮气会引起下列电子元器件发生故障：

（1）电阻器 其额定值逐渐增大或减小，直到电阻器断路或短路。

（2）电容器 空气中的水汽不仅能吸收电磁能量，而且加剧了电容器两个电极之间击穿的危险性，由于水的介电常数高，大多数电容器吸水率超过 0.1%就失效。

（3）半导体器件 会引起双极型器件反向电流和增益的漂移，引起场效应管阈值电压、沟道电流和跨导的漂移。

以上种种变化的结果，会降低参数的可靠性或增大偶然失效的概率。参数的可靠性降低，是指由于信号失真到使电子设备不能完成其正常功能。偶然失效概率的增大会缩短设备的平均故障间隔时间，增加设备的维护成本。

潮气对结构材料作用的结果，可能改变部件的参数：由于介质固有电容和损耗的增大而降低电感的品质因数、增大交叉干扰电平、降低电气安装的接触电阻等。当湿度达到一定限度还会使金属腐蚀急剧加快，一般铁的临界腐蚀湿度为 70%，锌为 85%，铝为 60%~65%。尤其是在日温差大的湿热环境下，由于材料毛细管的“呼吸”作用，将大大加速材料的吸潮和腐蚀过程，如昼夜的冷暖变化会使 O 形环或垫圈密封的电子设备在夜间吸潮，白天放出干热空气，当吸潮到一定程度就冷凝成水，进而产生腐蚀作用。

#### 4.2.1.3 潮湿的防护设计

电子设备防潮的主要目的，就是在生产、使用过程中以及在预定的存放期内，确保各个部件和整个产品的工作能力。我国东南沿海和南方处于湿热带气候区域，在湿热季节，平均气温高于 25℃，日温差最大可达 25℃，而平均相对湿度在 80%以上。因此在这些地方，电子设备防潮设计必不可少。

防潮设计的基本方法是对材料表面进行防潮处理，对元器件乃至整件进行密封、灌封、镶嵌、气体填充或液体填充，暴露的接触面应避免不同金属的接触，尤其是避免活泼金属和稳定金属的

接触。防潮湿措施有憎水处理、浸渍、灌封、密封等方法，可以采用单项或几项综合措施来防止湿气的影响。

### 1. 憎水处理

亲水物质的吸湿性和透湿性大，可以通过憎水处理改变其亲水性，使它的吸湿性和透湿性降低。用硅有机化合物蒸汽处理亲水物质，可以提高憎水能力。其方法是把硅有机化合物盛在容器中，放到加热器中加热到  $50\sim 70^{\circ}\text{C}$  让其挥发，使被处理的元件、零件在蒸汽中吸收有机硅分子，然后在  $180\sim 200^{\circ}\text{C}$  烘烤。有机硅分子深入元件、零件所有的细孔、缝隙并与水化合后，在元件、零件表面形成憎水性的聚硅烷膜或者使某些物质发生化学变化（如羟基的醚化），而使材料变得具有憎水性。

纤维材料（纤维、纸、纸胶板、胶合板、木材、织物等）的憎水处理可采用烷基氯硅烷和烷基取代的正硅酸脂等硅油处理。玻璃和高频陶瓷的憎水处理，可采用乙基三氯硅烷  $\text{C}_2\text{H}_5\text{SiCl}_3$  或二乙基二氯硅烷  $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{SiCl}_2$  与乙基三氯硅烷的混合物蒸汽来处理。此外，也可用二甲基二氯硅烷  $(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$  或烷基氯硅烷对玻璃和陶瓷进行憎水处理。

### 2. 浸渍

浸渍是将被处理的元件或材料浸入不吸湿的绝缘液中，经过一定时间使绝缘液体进入元件或材料的小孔、缝隙和结构件的空隙，从而提高元件或材料的防潮湿性能和其他性能。浸渍有两种方法：一般浸渍和真空浸渍。一般浸渍就是在大气压下进行浸渍处理；真空浸渍则是在具有一定真空度（ $10\text{mmHg}$ ）的密闭容器中进行浸渍处理。真空浸渍的效果好于一般浸渍。

浸渍主要用于线绕产品（变压器、电感线圈等）。浸渍时，空隙和气孔被填满，同时在绕组表面形成绝缘层。由于浸渍的结果，提高了电强度和机械强度，以及因排挤出热导率低的空气而改善了线绕部件的导热性。

设备的结构应保证浸渍剂容易渗透。浸渍剂品种很多，其性能各有不同，常用的有以下几种。

#### （1）酚醛绝缘漆

如 1031J 基酚醛醇酸漆，它的流动性和干透性良好，漆膜的耐热、耐潮和介电性能较高，可供线圈浸用；但机械强度较差。

一般零、部件用高频酚醛清漆浸渍。高频酚醛浸渍又称胶木化。胶木化就是将零件预热到  $100^{\circ}\text{C}$  清除潮气，然后趁热浸渍，最后在  $120^{\circ}\text{C}$  烘干。零件胶木化后，强度提高，耐热性好，但变得硬而脆。若要求较高时，胶木化可进行真空浸渍。由于胶木化的固化温度较高，故丝纱包线的线圈不宜作胶木化处理。

#### （2）三聚氰胺醇酸绝缘漆

如 1032 三聚氰胺醇酸漆，其热固化性好，漆膜的附着力强并具有较高的耐热耐潮和介电性能，可作为工作于湿热地带的线圈、玻璃布层压制品和塑料表面的浸渍漆。类似性质和用途的还有 EA8340 三聚氰胺环氧醇酸漆。

#### （3）有机硅聚脂浸渍漆

如 1050 有机硅浸渍漆具有良好的热固性和浸渍能力，漆膜具有高的耐热、耐寒和介电性能，供长期工作温度为  $180^{\circ}\text{C}$  和短期工作温度为  $250\sim 300^{\circ}\text{C}$  的电器线圈做浸渍用。此外还有 1051、1052 和 1053 等有机硅浸渍漆，具有较高的耐热性和绝缘防潮性，可作为玻璃丝包线及玻璃布浸渍用，并可作晶体管外壳的保护层。

#### （4）环氧脂无溶剂绝缘烘漆

如 H30-1 环氧脂无溶剂绝缘烘漆，具有良好的附着力，其耐油性和柔韧性也较好，可作为高

强度漆包线、玻璃丝包线绕制的线圈和变压器真空浸渍材料。

浸渍剂的选用取决于对元件或材料提出的要求。通常浸渍剂应具有良好的渗透能力、化学中性、表面强化能力、良好的附着能力与优良的导热性和耐热、耐冷性。

### 3. 灌封

在元器件本身或元器件与外壳间的空间或引线孔中,注入加热熔化后的有机绝缘材料,冷却后自行固化封闭,此种工艺叫灌封或灌注。

灌封的防潮性能是由灌封材料或混合物的物理特性、灌注层厚度、通过灌注层的引线数量等因素共同决定的。对于灌封材料的要求主要是应具有优异的黏附力、很小的透湿性、较高的软化点以及优良的向物体缝隙的渗透能力。常用的灌封材料有环氧树脂、石蜡、沥青、油、不饱和聚酯树脂、硅橡胶等。环氧树脂有高温固化和室温固化两种。高温固化的灌封防潮性能好且强度高,但收缩率大,对线圈的电感  $L$  和  $Q$  值影响大;室温固化的灌封收缩率小,对线圈的电感  $L$  和  $Q$  值影响小,但防潮性能较差。线圈(如中周、微调电感、滤波器、疏密线圈等)常用聚乙烯醇缩丁醛胶来灌封或灌注,起到防潮和固定作用。

硅泡沫灌封材料除了具有一般硅橡胶的特点外,还具有密度小、弹性好、高温低温都可应用和工艺简单的特点,适用于有重量限制和有绝热要求的元器件的灌封。有机硅灌封材料的另一特点是易于修缮,发生故障时,可切去一部分,修缮完之后,灌入新料熟化后就可恢复原貌。

为了提高元器件的防潮性能,还可以进行塑料灌封。其方法是将元器件装入预先制好的模型中,再将合成材料(如聚丙烯腈,聚甲基丙烯酸甲酯及改性聚苯乙烯等)加热压入模型内,将元器件包封起来。也可用真空热解气相堆积成膜法,在元器件、部件上形成一层合成材料薄膜,达到防潮目的。

由于灌封材料与引线间因线膨胀系数的差异形成的毛细管会降低防潮性能,因此可将引线做成螺旋或多次弯曲形状,以延长潮气沿毛细管侵入的路程,从而提高灌封的防潮性能。

灌封除可保护电子元件避免潮湿、腐蚀外,还能避免强烈振动、冲击及剧烈温度变化等对电子元件的不良影响。但此法多适用于小型的单元、部件及元器件,如小型变压器、密封插头、固体电路、微膜组件及集成电路等。

浸渍、蘸渍和灌封所用的绝缘材料都具有不同程度的吸湿性,因此潮气通过扩散或“呼吸”作用仍能进入元器件中,但在相对湿度不大的情况下,采用吸湿性很小的绝缘材料,能够有效地防止潮气的进入,使元器件的防潮性能得到提高,所以仍得到广泛应用。

### 4. 密封

密封是防止潮湿长期影响的最有效方法。密封是将电子设备的分机、部件、零件、元器件或一些复杂的装置,甚至整机安装在不透气的密封盒内,使之和外界隔绝。这种防潮手段属于机械防潮。

在密封盒内根据需要可以充入液体、气体和高压气体。例如,可以充入氢气、氦气、氮气或绝缘油。充入高压气体或绝缘油可提高抗电强度,充入氢气、氦气、氮气可提高散热能力。

密封结构分为不可拆卸密封和可拆卸密封。

不可拆密封采用金属板材料经冲压成型的盒形结构,将电子设备或分机、部件装入盒内后,用焊接的方法与盒盖焊封。一般只适用于一次性使用设备,如导弹和卫星上使用的设备、深海电缆的接力站等。

对于需要经常修理、维护的设备,采用可拆卸密封结构。它的密封是把橡胶填充在盒体和盒盖之间,当连接螺钉拧紧后,使橡胶变形紧贴在金属表面上从而形成密封。

### 5. 其他防潮湿手段

采用具有防水、防霉、防锈蚀的材料；提供排水疏流系统或空气循环系统，消除湿气聚积物；采用干燥装置吸收湿气；采用保护涂层以防锈蚀。

作为防潮湿的辅助手段，有时对某些设备采用定期通电加热的方法来驱除潮气，也可以用吸潮剂吸掉潮气。常用硅胶作吸潮剂，它具有很大的吸水性，可吸收它本身重量的 30% 的水分，硅胶吸水达到饱和时呈蓝紫色，可在 120~150℃ 的烘箱中烘干后继续使用。

## 4.2.2 盐雾的侵蚀及防护

### 4.2.2.1 盐雾的侵蚀

由于海水被海风（包括巨大的台风）吹卷及海浪对海岸冲击时飞溅的海水微滴被卷入空中，与潮湿大气结合形成带盐分的雾滴，称为盐雾。盐雾主要对海上和近海处有影响，陆上只在离海 400m 和高度约 150m 范围内的盐雾腐蚀作用较大。

水分中溶解的盐具有两个独立的侵蚀作用：一是腐蚀许多金属和无机材料；二是提供一种活性电解质，使不同金属接触时产生电偶腐蚀，并促进具有不同电动势或在不同电压下的金属的电解作用。

盐雾中对金属起破坏作用的主要是  $\text{Cl}^-$ 。金属表面常有一层钝态的氧化膜起着保护作用，但由于  $\text{Cl}^-$  很小，穿透力强，能在金属表面形成微电极造成腐蚀，该电解质具有很强的导电性，它的存在使绝缘电阻下降。盐雾腐蚀的速度随温度、湿度的增高而增加。温度可促进化学因素的腐蚀，温度升高 10℃，腐蚀速度可提高 2~3 倍，电解质的电导率可提高 10%~20%。相对湿度 RH 临界值是 70%；当  $\text{RH} < 70\%$  时，腐蚀很慢；当  $\text{RH} > 70\%$  时，则盐类发生潮解作用，形成电解液膜，发生化学腐蚀。

钢铁制品在盐雾作用下最容易生锈，其使用寿命要比无盐雾作用时短得多。即使不锈钢暴露在盐雾的大气中，也会很快发生锈蚀，沿海地区和海船上暴露在大气中的电线电缆，以及其他各种金属结构和设备，常常在短时期内便会遭受盐雾的严重腐蚀。此外，盐雾会使设备内的零部件、元器件表面上蒸发析出固体结晶盐粒，会引起绝缘强度下降，造成短路和漏电；很细的结晶盐粒若侵入机构的运动部分会加速磨损。第一次世界大战期间，因盐雾、海水腐蚀，造成 40% 的英国战舰返修。

### 4.2.2.2 盐雾的防护

防盐雾设计的基本原则是：采用密封结构，选用耐盐雾材料（不锈钢或以塑料代替金属），元件部件采用相应的防护措施，涂覆有机涂层，不同金属间接触要防接触腐蚀。

#### （1）严格电镀工艺

工件镀前的清洗工作非常重要。如果在电镀前的工件上存在锈蚀产物、油污、脏物等，未彻底清洗干净，将影响镀层与金属基体的结合力，电镀结果便会出现镀层变暗、起泡和存在针孔等现象。

#### （2）保证电镀层的厚度符合规定

防盐雾与防潮湿本质上都是减少或避免金属制品遭到腐蚀。要达到这个目的，就要求具有保护性的电镀层有一定的厚度。因为无论何种电镀层，由于电镀过程中，随着镀层金属离子得到电子沉积在镀件表面的同时，或多或少也有氢离子得到电子的发生， $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow$ （逸出）。所以

各种镀层均会有不同程度的孔隙率，它也是衡量防腐蚀性能的指标之一。当然，镀层越厚则孔隙率愈小。对于一般结构件，若是钢铁零件镀锌，其镀层最小实际厚度应为  $24\mu\text{m}$  以上；镀镉的最小厚度在  $15\mu\text{m}$  以上；铜与铜合金零件上镀镍、镀铬或镀银的镀层厚度均应在  $6\mu\text{m}$  以上。钢铁零件上镀铜、镀镍、镀铬，需要  $30\mu\text{m}$  以上的铜镀层加  $15\mu\text{m}$  以上的镍镀层和  $0.5\mu\text{m}$  的铬镀层，才能获得良好的防腐蚀效果。

镀层厚度与防盐雾能力关系很大。例如，在钢铁上镀镉，防盐雾能力一般比镀锌要强得多。但镉镀层若低于  $10\mu\text{m}$ ，在盐雾中防护能力就很差。而锌镀层只要能达到  $24\mu\text{m}$  以上的厚度，并使镀层钝化好，在盐雾中就能获得良好的防护能力。由于镀锌比镀镉在价格上要便宜得多，所以常用提高锌镀层厚度，并结合钝化处理与表面油漆覆盖来代替镀镉作为防盐雾处理。当然对于某些不能进行表面油漆覆盖的零件，以及对防盐雾要求较高的零件，在湿热的海洋气候下，还是应该采用有足够厚度的镉镀层。

### (3) 镀层种类的选择

不同的镀层材料，显然抵抗盐雾腐蚀的能力不一样，价格也大不相同。比如通常在钢铁表面镀锌、镀镉，镀铅锡合金、镀镍钴合金等。但在一些具有特殊要求的高精尖的元器件和零部件上，可采用镀铂、镀钯、镀铑等措施。铂、钯、铑化学性质极为稳定，它们的镀层不仅具有极高的抵抗各种腐蚀的能力，而且具有某些特殊的物理性能。但这些材料来源稀少，价格昂贵，只在很特殊的要求下才应用。

## 4.3 金属腐蚀及其防护

电子设备中大量应用金属材料，金属材料和周围腐蚀介质发生化学或电化学反应，从而导致金属的腐蚀。如某些金属零件或结构长期暴露在大气中，受水蒸气的作用，就会在金属表面形成氧化物和盐类，这就是腐蚀。腐蚀从金属表面开始逐步深入内部，使金属零件的机械性能变坏甚至失效；用于导电的金属零件也将剧烈降低导电性能，增加损耗或产生接触不良；机械传动系统的精度降低；电磁元器件的参数改变。此外，金属腐蚀还带来了增加对设备维修、零件更换的次数，以及为采取防腐蚀措施而增加生产工序等间接损失。

人人熟知的生锈专指铁或铁合金的腐蚀现象，其他的材料虽然也会腐蚀，但不称为生锈。金属的电化学腐蚀与电镀的原理相似，差异只在于结果不同。

自然界中绝大多数物质，都有变成氧化物或是形成稳定化合物的倾向，金、铂等贵金属除外，自然界中甚少有单纯金属存在。因此，当我们由矿石或是氧化物中提炼完成所需的工程材料，例如，铁、铜、铝时，它们就开始有了回归稳定的趋势，在许可环境下，它们会再度变为金属化合物，这种现象可以说是发生腐蚀的基本原因。因此，材料在某种适当的环境下，不论经由化学或是电化学反应方式而发生腐蚀，也是自然现象，而防治腐蚀的积极意义则恰恰在于提供材料更长的使用寿命。

在日常生活中，许多环境因素，如水分、高温，或者酸、碱等化学物质的诱导，都可能引起金属的腐蚀。

### 4.3.1 金属腐蚀的机理

金属材料发生腐蚀的原因，可以分为化学腐蚀和电化学腐蚀两大类。在这两类腐蚀中，又以电化学腐蚀较为重要，也较易被忽视。

#### 4.3.1.1 金属的化学腐蚀

化学腐蚀又称为直接溶解，通常是指材料置于一种可以溶解的溶液环境中，直到材料全部耗尽（腐蚀）或是溶液达到饱和点。其他诸如高温、湿度等环境条件，使材料因加速产生氧化作用进而腐蚀也属于化学腐蚀。

（1）选择性滤除 有些金属合金材料在特殊环境下，其中的一种或多种元素容易被选择性腐蚀，而变成多孔性的残留物，降低了材料的机械性质，这种现象称为选择性滤除。这样的现象与金属的本质有关，如黄铜中所含的锌在高温下会被盐类的水溶液所溶解，产生脱锌的局部腐蚀现象；而缺少锌的位置，将使得黄铜变成多孔性结构，机械强度极为脆弱。

（2）石墨化腐蚀 灰铸铁如果置于水中或是土壤中，铁将较具阳极性而石墨将较具阴极性，铁的部分将被腐蚀，而形成多孔性的外观。因此灰铸铁制成的管线，必须有积极的防蚀措施，如果埋设不当，容易发生泄漏甚至爆炸等事件。

#### 4.3.1.2 金属的电化学腐蚀

电化学腐蚀是最重要的腐蚀反应，因为大多数金属腐蚀的起因，都可说是一种电化学反应。这里所说的电化学反应，是指在相同或不同的金属物体中，由于各种因素使某些部位产生了局部的阳极反应，让金属失去一个或多个电子，变成金属阳离子，即发生阳极氧化作用；而在同时，另一地点也会产生阴极反应，获得多出的电子，使得阴极形成还原作用，而构成一个电池效应的现象。这种电池效应使阳极金属造成消溶腐蚀，称为电化学腐蚀。

##### 1. 电化学腐蚀发生的原因

在电化学反应里，它将失去电子的一方称为阳极，而获得电子的一方称为阴极；当两极之间具有一个低电阻的导电通路时，阳极金属就会发生腐蚀。阴极反应通常不会发生电镀效应，其还原反应多生成气体、液体或固体。

两种不同的金属就容易发生这种现象，这其中一种金属会较容易失去电子（阳极），而另一种金属则较容易获得电子（阴极），透过适当的通路，其结果是使得阳极金属陆续解离形成金属离子（被腐蚀）。反之，阴极金属则因此受到保护。

相同的金属也可能会发生电池效应。例如，同一金属构件表面有局部变异而形成两极，或是搭接物体的夹缝内藏有盐类或尘垢等。此外，温湿环境可以增加电解液的活动程度增大腐蚀；而当金属表面生成海绵状的化合物，就足以容纳更多水分继续其电池作用，并且向内腐蚀金属。

大多数金属如果置于溶液中，其内部都具有化学电压将其离子送入溶液中的趋势，只是大小的程度不同而已。这种金属受环境溶液诱惑的趋势称为“电溶压”。电溶压大的金属，因为容易化为金属离子，所以比较易受腐蚀。

电溶压用在电化学上又称为“伽凡尼电位”或是“电解电位”，简称电位。不同的金属具有不同的电位，所以当两种不同金属搭接在一起时，由于两者的电位差，就会产生电流，其原理正如同水往低处流的情况一样。这种电池效应的结果，因电流的通过（从阳极流向阴极），使较高电位金属发生阳极消溶腐蚀。电位差愈大，产生的电流愈强，腐蚀损耗率就愈大。

在海水、淡水溶液或其他工业气氛中，伽凡尼电位序也可能会有差异，以海水中的伽凡尼电位序而言，依金属电位由大到小将金属顺序排列，依序为钾（K）、钠（Na）、镁（Mg）、铝（Al）、锌（Zn）、镉（Cd）、铁（Fe）、钴（Co）、镍（Ni）、锡（Sn）、铅（Pb）、铜（Cu）、银（Ag）、铂（Pt）、金（Au）。



上述电位序中, 电位序在前的金属对电位序在后的金属将形成阳极; 反之, 电位序在后的金属对于电位序在前的金属成为阴极。

## 2. 金属腐蚀的电化学历程

一个腐蚀电池必须包括阴极、阳极、电解质溶液和连接阴阳极的电子导体四个不可分割的部分。腐蚀电池的工作历程主要由下列三个基本过程组成:

(1) 阳极过程 金属溶解, 以离子形式进入溶液, 并把适当的电子留在金属上。

(2) 阴极过程 从阳极流过来的电子被阴极表面附近溶液中能够接受电子的物质所吸收, 即发生阴极还原反应。

(3) 电流的流动 在金属中依靠电子从阳极流向阴极; 在溶液中则是依靠离子的迁移: 阳离子从阳极区移向阴极区, 阴离子从阴极区移向阳极区。

按照这种电化学历程, 金属的腐蚀破坏将集中出现在阳极区, 在阴极区将不发生可察觉的金属损失, 它只起了传递电子的作用。因此, 除金属外, 其他电子导体, 如石墨、过渡元素的碳化物和氮化物、某些氧化物都可成为腐蚀电池中的阴极。在有些情况下, 阴、阳极过程也可在同一表面上随时间交替进行。但在很多情况下, 电化学腐蚀是以阴、阳极过程在不同区域局部进行为特征的, 这是区分电化学腐蚀和纯化学腐蚀的一个重要标志。

腐蚀电池工作时所包含的上述三个基本过程是相互独立的, 又是彼此紧密联系的。只要其中一个过程受到阻滞, 其他两个过程也将受阻而不能进行, 从而使金属腐蚀受到阻滞。

腐蚀过程中, 阳极和阴极反应的直接产物称为一次产物。当阴、阳极的一次产物在浓差作用下扩散而相遇时, 可导致腐蚀次生过程的发生——即形成难溶性产物, 称为二次产物或次生产物。一般情况下, 腐蚀次生产物在溶液中阴、阳极一次产物相遇处形成。若阴、阳极直接交界, 则难溶性次生产物可在直接靠近金属表面处形成较紧密的、具有一定保护性的氢氧化物保护膜粘附在金属上, 有时可覆盖相当大部分的金属表面, 从而对腐蚀有一定阻滞作用。腐蚀过程的许多特点与形成的腐蚀产物膜的性质有很大关系。

## 3. 腐蚀电池的类型

根据组成腐蚀电池的电极尺寸大小及阴、阳极区分布随时间的稳定性, 并考虑到促使形成腐蚀电池的影响因素和腐蚀破坏的特征, 一般可将腐蚀电池分为宏观腐蚀电池和微观腐蚀电池两大类。

### (1) 宏观腐蚀电池

通常是指由肉眼可见的电极所构成的腐蚀电池, 电池的阴极区和阳极区往往保持长时间的稳定, 因而导致明显的局部腐蚀。宏观腐蚀电池有以下3种。

① 异种金属接触电池。即不同金属在同一电解液中相接触构成的腐蚀电池。

② 浓差电池。即同一种金属浸入不同浓度的电解液中形成的腐蚀电池。金属的电位电极与金属离子的浓度有关, 当金属与含不同浓度的该金属离子的溶液接触时, 浓度稀处, 金属电位较负; 浓度高处, 金属电位较正, 从而形成金属离子浓差腐蚀电池。在一定条件下, 一些金属的电位与溶液中含氧量有关。当同一金属的不同部位所接触的溶液具有不同的含氧量时, 有可能使各部位的电位不相同, 因而形成腐蚀电池。这种电池称为差异充气电池或氧浓差电池。

③ 温差腐蚀电池。金属浸入电解质溶液中各部分由于温度不同而具有不同的电位, 因而形成腐蚀电池。

### (2) 微观腐蚀电池

由于金属表面存在着电化学不均匀性, 使金属表面出现许多微小的电极, 从而构成各种各样的微小的腐蚀电池, 简称为微电池。

① 金属表面化学成分的不均匀性引起的微电池。金属表面上的杂质以微电极的形式与基体金属构成许多短路的微电池。

② 金属组织不均匀性构成的微电池。金属晶界的电位通常比晶粒内部电位低，成为微电池的阳极，腐蚀首先从晶界开始。多相合金中不同相之间的电位不相同，是形成腐蚀微电池的另一重要原因。此外，金属及合金凝固时产生的偏析，也是引起电化学不均匀性的原因。

③ 金属物理状态不均匀性引起的微电池。金属各部分变形不均匀，或应力不均匀，都可引起局部微电池。通常，变形较大或受应力较大部分为阳极。

④ 金属表面膜不完整引起的微电池。金属表面钝化膜或其他具有电子导电性的膜或涂层，由于存在孔隙或破损，该处的基体金属通常比表面膜的电位负，形成膜-孔电池；孔隙处为阳极，遭到腐蚀。这类微电池又常称为活化-钝化电池。

应当指出，微电池的存在并不是金属发生电化学腐蚀的充分条件。要发生电化学腐蚀，溶液中还必须存在着合适的氧化性物质作为阴极去极化剂。微电池的分布和存在，可以影响金属电化学腐蚀的速度和分布形态。

#### 4. 阳极极化和阴极极化

当电极上有电流通过时，电极电位显著偏离了未通电时的开路电位（平衡电位或非平衡的稳定电位），这种现象称为电极的极化。阳极上有电流通过时，其电位向正方向移动，称为阳极极化。阴极上有电流通过时，电位向负方向移动，称为阴极极化。

##### （1）发生阳极极化的原因

① 活化极化（或电化学反应极化）。阳极过程是金属离子从金属转移到溶液中，并形成水化离子。由于反应需要一定的活化能，使金属离子进入溶液的速度迟缓于电子由阳极通过导线流向阴极的速度，因此阳极有过多的正电荷积累，改变双电层电荷分布及双电层间电位差，使阳极电位向正方向移动。

② 浓差极化。阳极溶解产生的金属离子，首先进入阳极表面附近的溶液层中，从而与溶液深处产生浓度差。由于金属离子向溶液深处扩散速度不够快，致使阳极附近金属离子的浓度逐渐增高。这如同该金属插入高浓度金属离子的溶液中，因此电位变正，产生阳极极化。

③ 电阻极化。当金属表面有氧化膜，或在腐蚀过程中形成膜（氧化膜或腐蚀产物膜）时，金属离子通过这层膜进入溶液有很大的电阻，阳极电流在此膜中产生很大的电阻，从而使电位显著变正。

##### （2）阴极极化的原因

① 活化极化（或电化学反应极化）。由于阴极反应需要达到一定的活化能才能进行，使阴极还原反应速度小于电子进入阴极的速度，因而电子在阴极积累，结果使阴极电位向负方向移动，产生阴极极化。

② 浓差极化。由于阴极附近反应物或反应产物扩散速度的缓慢，可引起阴极浓差极化。例如，当阴极反应为溶液中的氧发生还原反应时，由于溶液中的氧到达阴极的速度小于阴极反应本身的速度，造成阴极表面附近氧的缺乏，结果产生浓差极化，使电位变负。

消除极化的过程，称为去极化。消除阳极极化，称为阳极去极化；消除阴极极化，称为阴极去极化。搅拌溶液，加速金属离子的扩散，消除金属表面膜等，都可以加速阳极去极化过程。同样，搅拌溶液也可以消除阴极极化。显然，无论是阳极去极化作用还是阴极去极化作用，都会加速金属腐蚀的进行。

### 4.3.1.3 金属腐蚀的形态

按腐蚀形态分类,金属腐蚀可分为全面腐蚀和局部腐蚀两大类。从腐蚀控制角度看,全面腐蚀可以预测和及时防止,危害性较小。而对某些局部腐蚀目前预测和防止仍存在困难,往往在没有先兆的情况下,使金属突然发生破坏,常造成非常严重的后果。

#### 1. 全面腐蚀

其特征是腐蚀分布于金属整个表面,腐蚀结果使金属变薄。例如钢或锌在稀硫酸中、钢铁在大气中的腐蚀等。

当一种金属置于电介质(或电解质)中,金属的某部分区域会比其他区域更为“阳极”,而且这些区域的位置会不时移动,有时也会周而复始,这样的现象使腐蚀现象在各处均匀发生,称为均匀腐蚀。平常所见的铁生锈即属于这种形态,金属的高温氧化或是镍的成雾状都是均匀腐蚀的例子。

均匀腐蚀的速率,通常可以用几种单位表示。国内外常用的有每年侵蚀的 mm 数、密尔数(mpy, mils penetration per year, 1mil=0.025mm)和英寸数(ipy, inches penetration per year),但有时由于不易量度,也以损失的重量 mdd(milligrams per square decimeter per day)或每年损失的重量再来推估 mpy 等其他各种数值。以钢为例,在海水中的腐蚀速率约为 25mdd,相当于 5mpy。

一般来说,腐蚀的初始速率常较最终速率为大,因此测定腐蚀速率时,要记录整个过程。而材料如果腐蚀速率在 1mpy 以下为抗蚀性强,50mpy 以上防蚀性转劣,在 200mpy 以上则是无法接受。

#### 2. 局部腐蚀

特点是腐蚀仅局限或集中在金属的某一特定部位。发生局部腐蚀时,阴极和阳极区截然分开,通常能够宏观地识别,至少能用微观检查方法加以区分和辨别。腐蚀电池中的阳极溶解反应和阴极区腐蚀剂的还原反应在不同区域发生。

按照金属发生局部腐蚀时的条件、机理或外露特征,局部腐蚀可以分为几种类型,主要有电偶腐蚀、缝隙腐蚀、点腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀断裂、腐蚀疲劳、磨损腐蚀等。

##### (1) 电偶腐蚀

当两种电极电位不同的金属或合金相接触并放入电解质溶液中时,即可发现电位较负的金属腐蚀加速,而电位较正的金属腐蚀反而减慢(得到了保护)。这种由于同电极电位较正的金属接触而引起腐蚀速度增大的现象,称为电偶腐蚀,也称接触腐蚀。

电偶腐蚀实际为宏观原电池腐蚀,这类腐蚀例子很多,如黄铜零件与纯铜管在热水中相接触形成电偶腐蚀,使黄铜腐蚀被加速产生脱锌现象。碳钢与不锈钢接触、钢与轻金属相接触也会形成电偶腐蚀。有时甚至不同的金属虽没有直接接触,但在某些环境中也有可能形成电偶腐蚀。

产生电偶腐蚀的推动力来自两种不同金属接触的实际电位差。一般来说,两种金属的实际电极电位差愈大,电偶腐蚀越严重。实际电位是指电偶序中的电位。电偶序是根据金属或合金在一定条件下测得的稳定电位(非平衡电位)的相对大小排列的次序表。在电偶序中距离越远的金属或合金,产生的电位差越大,越不应互相耦合或接触。

在电偶序中通常只列出金属稳定电位的相对关系,而很少列出具体金属的稳定电位值。其主要原因是实际腐蚀介质变化较大,如海洋环境中海水的温度、成分及流速都很不稳定,测得的电位值波动范围大,数据重现性差,只是一种经验性数据。

电偶腐蚀除了与接触的金属材料的本性有关外,还受其他因素影响,主要有阴、阳极的面积比,温度等环境因素以及溶液电阻。通常,增加阳极面积可以降低腐蚀率;而小阳极和大阴极构成的电偶腐蚀最危险。

### (2) 穿孔腐蚀 (Pitting corrosion)

穿孔腐蚀又称点蚀。金属发生点蚀时,在表面的局部地区形成向深处发展的腐蚀小孔,其余地区不腐蚀或腐蚀很轻微。蚀孔直径只有数十微米,而深度大于或等于孔径,分散或密集分布在金属表面上,孔中多数被腐蚀产物覆盖。

金属组件处于腐蚀环境中,由于位置的不同而使含氧量有浓淡之分,此时含氧浓度高之处为阴极,而含氧浓度低的地方为阳极,因而发生了腐蚀现象,这种电池效应又称为氧浓差电池。穿孔腐蚀发生的起始位置都是在含氧浓度不均或是材质不均的位置,如铝及铝合金、不锈钢、耐热钢、钛合金等具有自钝化性的金属或合金,尤其容易发生在金属表面钝化膜有缺陷的地方,如杂质、晶界、位错等薄弱部位。也发生在表面有阴极性镀层的金属上,如钢表面镀锡、铜、镍,在镀层孔隙处或镀层被破坏处。首先是由于孔洞的底部氧不容易补充,缺氧的结果使得金属发生分解反应,而在孔洞上方的周围有较高浓度的氧,而发生还原反应,因此孔洞四周受到保护,而不会腐蚀。使腐蚀向深处发展,以至于形成小孔。这样的现象如果发生在酸性的溶液中(如氯化氢(HCl)),溶液中所含的( $\text{Cl}^-$ 氯离子)便会向孔洞的位置集中,使孔洞中的氢(H)浓度增加,而增加阳极的反应速率,结果整个穿孔腐蚀的过程变成为自动催化的现象,加速了整个腐蚀。

影响点蚀的主要因素有金属或合金的性质、表面状态、介质的性质等。点蚀容易发生在含有氯离子或氯化物的腐蚀介质中,在阳极极化条件下,介质中只要含有氯离子,金属就很容易发生点蚀,并随氯离子浓度加大而加速,其他阴离子、过氧酸盐或硫酸盐等也可以诱发点蚀。金属表面状态对点蚀有一定影响。通常,光滑和清洁的表面不易发生点蚀。积有灰尘或各种金属的和非金属的杂屑的表面,经冷加工的粗糙表面,或加工后残留在表面上的焊渣等部位,往往引起点蚀。介质的温度升高,使点蚀加速。介质处于静止状态,金属点蚀速度比介质处于流动状态时为大。

对金属耐点蚀性能的评定,可用测量蚀孔深度、孔数、失重等指标。蚀孔的最大深度与按失重计算的金属平均腐蚀深度之比称为点蚀系数,其数值越大,表示点蚀越严重。也可利用电化学测量方法,测量临界点蚀电位。

### (3) 间隙腐蚀 (Crevice corrosion)

金属表面上由于存在异物或结构上的原因会形成缝隙,由于缝隙内溶液中与腐蚀有关的物质(如氧)迁移困难所引起的缝隙内金属的腐蚀称为缝隙腐蚀。不论是同种或异种金属相接触(如铆接、焊接、螺纹连接等),还是金属同非金属(如塑料、橡胶、玻璃、木材、石棉、织物以及各种法兰盘之间的衬垫等)相接触,都会引起金属缝隙腐蚀。金属表面的一些沉积物、附着物,如灰尘、沙粒、腐蚀产物的沉积等也为缝隙腐蚀提供了条件。几乎所有的金属、所有的腐蚀介质都有可能引起缝隙腐蚀。

间隙腐蚀的机构很类似穿孔腐蚀的情况。首先是均匀腐蚀,然后因氧浓差电池会引起阳极反应(缺氧区)和阴极反应(富氧区),由于间隙内无法补充氧,故阳极反应会继续在同一个位置进行,因此产生了严重的腐蚀结果。

在不锈钢发生间隙腐蚀的现象中,有氯离子( $\text{Cl}^-$ )存在是一个非常重要的因素,例如,在氯化钠( $\text{NaCl}$ )溶液中,不锈钢的间隙腐蚀,是先由于氧浓差电池所产生,阳极反应在此时生成正离子 $\text{M}^+$ 。接着因为缺氧,所以阳极反应持续进行,形成高浓度的 $\text{M}^+$ ,并与 $\text{NaCl}$ 溶液中的 $\text{Cl}^-$ ,形成 $\text{M}^+\text{Cl}^-$ 。

缝隙腐蚀结果会导致部件强度降低,减小吻合程度,装配困难。

#### (4) 晶间腐蚀 (Intergranular corrosion)

晶间腐蚀又称为粒间腐蚀,是在金属晶界处发生的局部腐蚀现象。就电化学的观点来看,由于材料的晶粒为阴极,而晶界一般为阳极,因此在均匀腐蚀的情况下,晶界处的腐蚀性仍稍大于晶粒处;如果在特殊情况下,材料的晶界抗蚀元素又相对减少,晶间腐蚀的现象就会发生。

这种腐蚀从金属表面开始,沿着金属或合金的晶界发展。晶间腐蚀使金属晶粒间的结合力大大削弱,严重时可使机械强度完全丧失,只要轻轻敲打就可破碎,甚至形成粉末。发生晶间腐蚀时,金属晶界区的溶解速度远大于晶粒本体的溶解速度。

产生晶间腐蚀必须具备两个条件:一是晶界区某种物质比晶粒本体具有较高的电化学活性,因而在一定的腐蚀电位下更易于溶解;二是要有合适的腐蚀介质,在该介质中,足以引起晶界和晶粒本体的不等速溶解。

常用的金属材料中,不锈钢、镍基合金、高强度铝合金、镁合金等都是晶间腐蚀敏感性高的材料。304 不锈钢焊接过程如果加热或冷却于  $450\sim 900^{\circ}\text{C}$  之间(又称为敏感化温度),在晶界就容易析出碳化铬( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ),而使附近的铬量不足,发生“贫铬区”的现象,由于铬是不锈钢防锈的主要元素,加上晶粒与晶界的电池效应,因此可以在短时间内就发生晶间腐蚀的现象。

高强度铝合金在工业大气、海洋大气和海水中都能产生晶间腐蚀。在实际生产中,常通过合金化、热处理和适当的冷加工等措施来控制晶界的析出,以提高金属材料耐晶间腐蚀的性能。

评定晶间腐蚀敏感性的方法随金属材料的不同而异。对工业常用的不锈钢晶间腐蚀的评定,常采用在某些特定腐蚀介质中进行化学浸蚀或电解腐蚀,然后放大观察其表面腐蚀形态,或者测定腐蚀率并同基准试样腐蚀率加以比较。也可检测腐蚀后某些物理性能(如电阻率、声响)的变化。

#### (5) 应力腐蚀 (stress corrosion)

金属构件通常是在应力(外加应力或内应力)与环境介质共同作用下工作,因而常常导致更为严重的腐蚀破坏。由于受力情况是多种多样的(拉伸应力、交变应力、摩擦力、振动力等),所以与环境介质共同作用造成的腐蚀形态也不相同,可分为应力腐蚀断裂、腐蚀疲劳、磨损腐蚀、微振腐蚀等,其中最重要的是应力腐蚀断裂和腐蚀疲劳。

① 应力腐蚀断裂。指金属材料在固定拉应力和特定介质的共同作用下所引起的断裂。工程上常用的金属材料,如不锈钢、铜合金、碳钢和高强度钢等,在特定的介质中都有可能产生应力腐蚀断裂,并且按照腐蚀条件的苛刻程度,材料可以在几分钟或几年内断裂。由于这种断裂性破坏事先没有明显的征兆,所以往往会造成极为严重的后果。

发生应力腐蚀断裂需同时具备三个基本条件,即特定环境、足够大的拉伸应力和特定的合金成分和组织。因此,应力腐蚀是与环境因素、力学因素和冶金因素密切相关的。应力腐蚀断裂具有高度的选择性,在使用环境中没有敏感性的合金,即使有拉伸应力的作用也不会发生应力腐蚀断裂。

拉伸应力可能的来源有零件在冷加工、锻造、焊接、热处理、装配过程中产生的残余应力,工作时产生的外应力和使用中的载荷以及由于腐蚀产物的体积效应(由于腐蚀产物的体积往往大于其金属体积)而造成的不均匀应力。

在环境因素中,腐蚀介质对产生应力腐蚀断裂十分重要,只有在一定合金和一定环境的组合情况下才能发生这类腐蚀。此外,溶液的温度也有影响。温度升高,易发生应力腐蚀断裂。但温度过高,由于全面腐蚀的进行,却抑制了应力腐蚀断裂。对某些腐蚀体系来说,存在一个临界断裂温度,即在此温度下应力腐蚀断裂最敏感。

防止应力腐蚀断裂的措施主要有正确选择材料、降低或消除应力、控制环境条件和使用保护涂层等。

② 腐蚀疲劳。它是在腐蚀介质与循环应力联合作用下产生的一种局部腐蚀形态，是金属在腐蚀环境（通常指空气以外的腐蚀环境）下的疲劳行为。由于腐蚀介质而引起的抗疲劳性能降低，称为腐蚀疲劳。循环应力的形式较多，其中以交变的张应力和压应力（拉压交替变化）的循环应力为最常见。纯力学性质的疲劳是在一定的临界循环应力值（疲劳极限）以上时才会发生疲劳破坏，而腐蚀疲劳却可能在很低的应力条件下发生断裂，因而具有很大的危险性。

和应力腐蚀断裂不同，腐蚀疲劳没有介质的限定；纯金属一般不产生应力腐蚀断裂，但能产生腐蚀疲劳破坏。应力腐蚀断裂需要在临界值以上的静拉应力下才能产生，而腐蚀疲劳通常不存在疲劳极限，一般以指定循环周期的应力作为腐蚀疲劳强度。

金属腐蚀疲劳性能受力学因素与环境因素的影响。例如，应力循环频率对腐蚀疲劳有强烈影响，频率越低，腐蚀疲劳影响也就越大。一般来说，随温度升高，材料的耐腐蚀疲劳性能下降。介质的腐蚀性越强，腐蚀疲劳强度越低。耐蚀性较高的金属，如钛、铜及其合金、不锈钢等，对腐蚀疲劳的敏感性较小；耐蚀性较差的金属，如高强度铝合金、镁合金等，对腐蚀疲劳的敏感性较大。

防止腐蚀疲劳的方法：采用合适的覆盖层，减小应力集中，在金属表面造成压应力层，加入缓蚀剂，进行阴极保护等。

### ③ 磨损腐蚀。

a. 冲击腐蚀。金属表面受高流速和湍流状的流体冲击，同时遭到磨损和腐蚀的破坏，称为磨损腐蚀。冲击腐蚀是磨损腐蚀的主要形态。金属在高速流体冲击下，保护膜被破坏，破口处裸金属加速腐蚀。如果流体中含有固体颗粒，磨损腐蚀就更严重。它的外表特征是：局部性沟槽、波纹、圆孔和山谷形，通常显示方向性。暴露在运动流体中的设备，如管、三通、阀、鼓风机、离心机、叶轮、换热器、排风筒等都能产生冲击腐蚀。软金属如铜和铅更为严重。

冲击腐蚀多发生在流体改变方向的部位。如弯头、三通、容器内和入口管相对的部位。冷凝器和换热器管束入口处，流体由大截面进入小口，产生湍流，在管入口数十毫米处常发生严重腐蚀。

防止冲击腐蚀可以选用耐磨损较好的材料，如 20 号合金优于 18/8 不锈钢，90Cu/10Ni 优于 70Cu/30Ni（海水中），也可改进设计、改变环境，或用涂层和阴极保护等。

b. 空泡腐蚀。简称空蚀或气蚀，是磨损腐蚀的一种特殊形态。在高速液体中含有空泡，使磨损腐蚀十分严重。空泡的形成是由于液体的湍流或温度变化引起局部压力下降，空泡内只含少量水汽，存在时间非常短暂，气泡破裂时产生冲击波压力可高达 4000atm，使金属保护膜破坏，并可引起塑性形变，甚至撕裂金属粒子。膜破口处裸金属受腐蚀，随即重新生膜。在同一点上又形成新空泡，又迅即破裂，这个过程反复进行，结果金属表面生成致密而深的孔，外表很粗糙。泵叶轮和水力透平机等常产生空蚀。

防止空蚀可改进设计，以减小流程中流体动压差，也可选用较耐空蚀的材料或精磨表面，因为光洁表面不提供形成空泡的核点。用弹性保护层（塑料或橡胶）或阴极保护也有效。

c. 摩擦腐蚀。这也是磨损腐蚀的一种特殊形态，是指承受载荷、互相接触的两种物体表面由于振动和滑动（反复的相对运动）引起的破坏，也称微振腐蚀。它不发生在连续运动的表面上。摩擦腐蚀的危害非常大，产生的氧化锈泥常将精密的金属部件锈死，还会使接触面超过允许公差，产生的蚀孔还会引起疲劳破裂。

摩擦腐蚀最常见的例子是滚珠轴承套与轴之间，也发生在引擎、机车部件、螺栓连接的部件

等处。它的必要条件是反复的相对运动,位移小至  $10^{-8}\text{cm}$  即可引起破坏。例如,在远距离铁路和轮船运输中的汽车轴,表面承受载荷,又发生连续轻微振动,将产生摩擦腐蚀。正常行驶的汽车因为轴承表面间的相对运动非常大(旋转),就不发生这种腐蚀。

摩擦腐蚀的原因是摩擦作用破坏了金属保护膜,裸金属迅速氧化,磨损和氧化反复进行,使破坏加剧。另外,金属表面因受压产生冷焊或熔化,其后由于相对运动使金属碎粒脱落,并迅速氧化。二者都产生氧化锈粒,破坏金属界面。

防护方法可在接触表面涂润滑油脂,减小摩擦并排除氧,如果表面同时磷化更有效。还可选用硬质合金,喷丸处理或冷加工以提高表面硬度等。

#### (6) 脱层腐蚀

在金属层状结构层与层之间产生腐蚀,先垂直向内发展,然后改变方向,有选择地腐蚀与表面平行的物质。腐蚀产物的膨胀力使未腐蚀的表层成层状脱离。

#### (7) 氢腐蚀

① 氢鼓泡。对低强度钢,特别是含大量非金属夹杂时,溶液中产生的氢原子很容易扩散到金属内部,大部分氢原子通过器壁在另一侧结合为  $\text{H}_2$  逸出,但有少量氢原子积滞在钢内空穴,结合为  $\text{H}_2$ ,因氢分子不能扩散,将积累形成巨大内压,使钢表面鼓泡,甚至破裂。

当环境中含有硫化物、氰化物、含磷离子等阻止放氢反应的毒素,氢原子就会进入钢内产生鼓泡。石油工业物料常含有上述毒素,氢鼓泡是常见的危害。防止方法:除去这类毒素最为有效;也可选用无空穴的镇静钢以代替有众多空穴的沸腾钢。此外,可采用氢不易渗透的奥氏体不锈钢或镍的衬里,或加入缓蚀剂等。

② 氢脆。在低强度钢中晶格高度变形,当氢原子进入后,晶格应变更大,使韧性及延展性降低,导致脆化,在外力下可引起破裂。不过在未破裂前氢脆是可逆的,如进行适当的热处理,使氢逸出。一般钢强度越高,氢脆破裂的敏感性就越大。

进入金属的氢常产生于电镀、焊接、酸洗、阴极保护等操作中。应力腐蚀的裂尖酸化后,也将产生氢脆,但阳极腐蚀,已造成永久性损害,与单纯氢脆有别。氢脆与钢内空穴无关,所以防止方法与防氢鼓泡稍有不同:在容易发生氢脆的环境中,避免使用低强度钢,可用 Ni、Cr 合金钢;焊接时采用低氢焊条,保持环境干燥(水是氢的主要来源);电镀液要选择,控制电流;酸洗液中加入缓蚀剂。

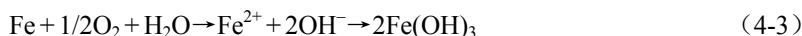
氢已进入金属后,可进行低温烘烤驱氢,如钢一般在  $90\sim 150^\circ\text{C}$  脱氢,金属可恢复原性能。

### 4.3.1.4 影响金属腐蚀的因素

如前所述,腐蚀发生的过程主要依化学反应和电化学反应两种方式进行。例如,铁的腐蚀就化学反应的观点而言,其在室温时大气中的氧化过程为:



而以电化学反应式表示则为:



但这只是反应过程描述的不同,实际上,随环境的改变,各种影响腐蚀因素更为复杂,它们会使腐蚀的程度或是形态都跟着改变,并且增加腐蚀的严重性。例如,大气中二氧化硫  $\text{SO}_2$ 、硫化氢  $\text{H}_2\text{S}$  等,经由电化学反应,这些物质更助长了材料的腐蚀。又如,铁置于高温环境中,其腐蚀形态不同于常温下的反应,而是直接与氧结合,形成  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (氧化铁)、 $\text{FeO}$ (氧化亚铁)、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$

(四氧化三铁)等氧化物。除了大气之外,土壤、溶液、酸碱度、散乱电流、制品的材料成分、热处理效应、加工效应等,也都是影响腐蚀的因素。

## 1. 大气

### (1) 大气腐蚀的电化学过程

大气腐蚀是电化学腐蚀的一种特殊形式,是金属在其表面覆盖一层水膜(电解液膜)下发生的腐蚀。空气中水分在金属表面凝聚而生成水膜和空气中的氧通过水膜扩散到金属表面,是发生大气腐蚀的基本条件。

① 金属表面水膜的形成。当金属暴露在室外,遭到大气沉降物(雨、雪、雾、露、冰等)的直接降落、周期浸水以及由于空气中水分的凝结(饱和水汽凝结、水蒸气冷凝)等原因,其表面易形成可见水膜。

② 阴极过程。在薄液膜下的大气腐蚀的阴极过程以氧去极化为主。

③ 阳极过程。金属发生阳极溶解,生成水化金属离子。

④ 控制因素。大气腐蚀的速度与电极过程的特征随着大气条件不同而变化。当金属表面水膜很薄(不可见的吸附水膜)时,氧易于到达阴极表面,阴极过程发生容易,而且阳极容易发生钝化,腐蚀速度主要由阳极过程控制,有时可能受阴阳两极共同控制。而在可见液膜下的宏观腐蚀电池下或金属表面因腐蚀产物吸水而润湿时,大气腐蚀速度主要由阴极过程控制。对于大气条件接触腐蚀来说,在极薄的水膜下,电池的电阻变得很大,腐蚀速度多半为欧姆电阻控制。

⑤ 腐蚀破坏形态。在一般情况下,大气腐蚀多数表现为均匀腐蚀,但随着材料的不同和所处环境差异以及应用情况的不同,往往也出现其他类型的局部腐蚀。

### (2) 大气腐蚀的影响因素

① 大气的相对湿度。金属表面水膜的形成与大气的相对湿度密切相关,因而相对湿度被认为是影响大气腐蚀的最主要因素之一。相对湿度就是指在某一温度下空气中的水蒸气含量与在该温度下空气中所能容纳的水蒸气的最大含量(饱和含量)的百分比。

在含有不同数量污染物的大气中,金属都有一个临界相对湿度,超过这一临界值腐蚀速度会突然猛增。在临界值之前,腐蚀速度很小或几乎不腐蚀。出现临界相对湿度,标志着金属表面形成了一层吸附的电解液膜,这层液膜的存在使金属从化学腐蚀转变为电化学腐蚀。

值得注意的是金属腐蚀的临界相对湿度还往往随金属种类、金属表面状态以及环境气氛不同而有所不同。如空气含有大量的工业气体,或金属表面沾有易吸湿的盐类、灰尘等,以及金属表面粗糙、裂缝和小孔增多,都使临界相对湿度降低。

② 温度和温差。温度是促使大气腐蚀的另一个重要因素,高温会加速氧化腐蚀的现象,这类损害称为高温加速氧化腐蚀或加速氧化,在一定的氧气浓度下(如密闭容器中),温度每增加 $30^{\circ}\text{C}$ ,腐蚀速率会增加一倍。

在热带、亚热带及大陆性气候地区,由于降雨或日夜温差,经常出现温度急剧变化,对金属腐蚀有很大影响。

③ 腐蚀性气体。工业大气中含有大量的腐蚀性气体,其中,最主要的腐蚀性成分是二氧化硫,它主要是由煤、重油、汽油的燃烧所产生,而含硫化物的酸雨更足以加速腐蚀的进行。对铁而言,由于二氧化硫经反应可以产生 $\text{H}_2\text{SO}_4$ , $\text{H}_2\text{SO}_4$ 与铁作用,经由上列反应式之催化,就会使铁产生更大的腐蚀。

④ 固体颗粒。空气中含有大量固体颗粒,其中有煤烟、灰尘等碳和碳的化合物、金属氧化物、沙土、氯化钠、硫酸铵和其他盐类。可溶性盐溶于水膜中,增加了水膜的导电性,促进腐蚀



的进行。一些本身不具有腐蚀性的颗粒,具有吸附气体的作用,如活性炭能吸附所以能大大加速金属腐蚀。固体颗粒沾附在金属表面,可造成毛细凝聚现象,常使金属产生缝隙腐蚀或点蚀。

⑤ 地区性。随地区条件的不同,大气的成分、温度、湿度等因素均有很大的差别,因而自然大气有不同的地区特征。例如,海岸地带大气中所含的盐分与湿气结合,可以形成伽凡尼电池或是氧气浓差电池;工业大气中则含有各种腐蚀性气体和固体颗粒;而农村地区的大气都比较洁净。其中,腐蚀性最强的是潮湿的、强烈污染的工业大气,而洁净干燥的农村大气腐蚀性最小。

### (3) 防止大气腐蚀的措施

防止大气腐蚀的措施主要有:采用耐大气腐蚀的金属;采用有机、无机涂层或金属镀层;控制大气相对湿度在临界相对湿度以下,并保持其清洁性。

### 2. 土壤

埋在地下的金属管道、通信电缆、接地设施、某些设备的金属基座等都会遭到土壤的腐蚀,并且往往由于难以检修而造成很大损失。

#### (1) 土壤腐蚀的特点

土壤腐蚀,是一种电化学腐蚀,土壤中含有的水分是引起金属腐蚀的根本原因。土壤中的氯化物、硫酸盐、硝酸盐等可溶性物质和一氧化碳等气体都能溶于地下水中而使其成为电解质溶液。土壤的导电性与土壤的干湿程度及含盐量有关。

大多数金属在土壤中的腐蚀是属于吸氧腐蚀,只有在强酸性土壤中,才发生析氢腐蚀。在疏松、干燥的土壤中,随着氧渗透率的增加,腐蚀转变为阳极控制,近似于潮的大气腐蚀。对于由长距离宏观电池作用下的土壤腐蚀,土壤的电阻成为主要的腐蚀控制因素,或者是阴极-电阻混合控制。

#### (2) 土壤腐蚀的类型

① 微电池腐蚀。对于比较短小的金属构件,可以认为周围土壤结构、水分、盐分、含氧量等是均匀的,这时发生与金属组织不均匀性有关的微电池腐蚀。

② 宏观电池腐蚀。对于埋设距离长或埋设深度不同的金属构件和管道,可能由于土壤介质的不均匀性(如透气性或含盐量不同),影响金属各部位的电位,形成氧浓差电池和盐分(电解质)浓差电池。这类宏观电池在阳极部位产生较深的腐蚀孔,使金属构件遭到严重破坏。

③ 微生物引起的腐蚀。在缺氧的土壤(如密实、潮湿的黏土)中,金属腐蚀似乎难以进行,但某些微生物的活动能够引起金属的强烈腐蚀。常见的有硫酸盐还原菌和硫杆菌腐蚀。硫酸盐还原菌是一种厌氧菌,由于硫酸盐还原菌参与阴极反应,使阴极过程变得容易进行,因而腐蚀加速。

#### (3) 影响土壤腐蚀的主要因素

① 孔隙度。孔隙度大,则有利于水分和氧的渗透,可加速腐蚀过程。

② 含水量。含水量很低时腐蚀速度不快,随着含水量的增加,盐分的溶解量增大,因而腐蚀速度加快。但水分过多,氧的扩散渗透受阻,腐蚀反而减小。

③ 含盐量。土壤中一般含有硫酸盐、硝酸盐和氯化钠等无机盐。含盐量大,土壤的电导率高,腐蚀性也强。海边潮汐区或接近盐场的土壤离子多,腐蚀性更强。

④ 导电性。土壤的导电性受土质、含水量及含盐量等影响。导电性好,腐蚀性强。一般的低洼地和盐碱地因导电性好,所以有很强的腐蚀性。用土壤的电阻率评价土壤腐蚀性是一种十分方便的方法,在某些场合也比较可靠。

⑤ 酸度。酸度越大,腐蚀性越强。衡量土壤腐蚀性时,应测量土壤的总酸度。

#### （4）防止土壤腐蚀的措施

① 覆盖层保护。可用环氧沥青涂层、环氧粉末涂层、石油沥青或煤焦油沥青涂层，一般用填料加固或用玻璃纤维布、石棉等缠绕加固。

② 处理土壤，减少其腐蚀性。如用石灰处理酸性土壤，或在地下构件周围填充石灰石碎块，移入腐蚀性小的土壤。

③ 阴极保护。施加适当的覆盖层和阴极保护相结合，对延长地下管道寿命是最经济的方法。

#### 3. 散乱电流

散乱电流是指非经正常电路而来的电流。当这类电流进入金属装置而后再离开时，其流经的表面就会产生腐蚀。散乱电流又分为直流及交流两类，而直流的影响又较大。直流散乱电流的来源是电气化火车、接地的直流电动机、电焊机、电镀工厂等，而交流散乱电流的来源是接地的交流发电系统等。

防范散乱电流的方法有：以低电阻金属导体结合受保护体（如地下水管）和散乱电流源（如电车轨道），以避免电位产生大的变化；阳极或阴极防蚀、装设绝缘耦合器等。

#### 4. 溶液

材料在中性、酸性、碱性等各种溶液中，会有不同的腐蚀速率；而溶液中的各种条件也会影响腐蚀的进行，例如，水溶液中氧的浓度、电解质、流速等。溶液是形成电化学腐蚀的重要介质，许多腐蚀现象因此而生。

##### （1）海水腐蚀的特征

海水腐蚀是吸氧腐蚀，多数金属的腐蚀受氧的去极化阴极过程控制，阴极过程的快慢取决于氧扩散的快慢。只有负电性很强的金属，如镁及其合金才发生析氢腐蚀。

海水对于大多数金属（如铁、钢、锌、铜等）来说，其阳极过程阻滞程度很小。在海水中利用提高阳极阻滞的方法来防止铁基合金腐蚀作用是有限的。即使不锈钢也可发生局部腐蚀，只有钛、锆、铌、钽等金属才能在海水中保持钝态，具有较强的耐海水腐蚀性。

海水导电性大，电阻性阻滞很小，金属表面形成的微电池和宏观电池都有较大活性。在海水中异种金属接触构成显著的电偶腐蚀，作用强烈，影响范围较远。

在海水中除发生均匀腐蚀外，还易发生点蚀和缝隙腐蚀等局部腐蚀。在高流速海水中，还易发生孔蚀和冲击腐蚀。

##### （2）影响海水腐蚀的因素

影响海水腐蚀的因素很多，主要有以下几种。

① 盐度。水中的含盐量直接影响水的电导率和含氧量。含盐量增加，电导率增加而含氧量降低，所以在某一含盐量时将存在一个最大腐蚀速度。在江河入海处或海港中，虽然海水被稀释，含盐量较低，却可能有较高的腐蚀性。因为这里水中的碳酸盐含量比大洋海水的含量低，达不到饱和，不易在金属表面形成保护性水垢，同时海水受到污染后腐蚀性增强。

② 含氧量。海水中溶解氧的多少是影响海水腐蚀的重要因素。海水表面因与大气接触，又有海浪的搅拌作用，所以含氧量较大。盐度增加和温度升高会使溶解氧量降低。对低碳钢、低合金钢和铸铁等在海水中不易发生钝化的金属，海水含氧量增加，会加速阴极去极化过程，使腐蚀速度加快。

③ 温度。不同的海域、深度温度不同，温度的提高会加速腐蚀速度。

④ 金属构件所处位置。对于普通碳钢，处于干、湿交替区的飞溅带，氧供应充足，腐蚀最为严重。随着海水深度增加，氧供应量减少，腐蚀速度降低。

⑤ 流速。流速增大, 氧扩散速度加快, 使腐蚀加速。流速很大时, 因受介质的冲击和摩擦等机械作用影响, 会出现冲击腐蚀等局部腐蚀现象。

⑥ 海洋生物。与海水腐蚀关系较大的是附着生物, 如藤壶、海藻、苔藓虫等。海洋生物的生命活动大多数起加大腐蚀的作用。

⑦ 其他因素。海洋的风浪条件、距离海面的高度和深入内陆的距离, 都会影响到海洋大气的腐蚀性。风浪大时, 大气中水分多、含盐量高, 腐蚀性增加。随着深入内陆的距离增加, 腐蚀性迅速减弱。频繁的降雨会冲刷掉金属表面沉积的盐分和吸附的尘埃, 使腐蚀减轻。温度升高则使海洋大气腐蚀加剧。因此, 同一地区的季节变化会影响腐蚀速度。不同海域由于温度及其他环境因素的差异, 海洋大气的腐蚀性差异较大, 一般热带腐蚀性最强, 温带次之, 两极区最弱。

### (3) 防止海水腐蚀的措施

防止海水腐蚀主要有下列措施:

① 选用耐海水腐蚀的材料。以钛合金和镍、铬、钼合金的耐蚀性最好。铜基合金, 如铝青铜、铜镍合金也较耐蚀。

② 涂层保护。采用油漆层或采用防止生物污染的防污涂层, 这是防止海水腐蚀最普遍的方法。

③ 电化学保护。在全浸区可采用阴极保护, 防止海水腐蚀。

### 5. 材料成分

材料成分稍有不同, 在水中和土壤中的腐蚀速率并没有显著的影响, 但在海水或酸性等其他环境中, 腐蚀速率就会受到影响。例如, 钢铁材料中含有磷及硫, 在酸中就会显著增加腐蚀速率。锰则会使含硫的钢减低酸中的腐蚀性, 镍在碱性溶液中也有类似的效果。

### 6. 热处理效应

材料经过热处理之后, 容易产生局部的电池效应, 有些地方形成阳极而有些地方形成阴极, 这样形成的伽凡尼电池也会影响腐蚀速率。但在实际上相对于其他因素, 热处理对腐蚀的影响并非很大, 只要注意加热或冷却的程序, 或添加适当的抑制剂都能将腐蚀速率减至最低。

### 7. 加工效应

材料在经过敲击或冷作之后都会产生残留应力, 这样的结果实际上是产生了晶格缺陷或是碳化物、氮化物等的偏析现象, 因而形成局部电池效应, 应力腐蚀就是这一类腐蚀的代表。

如果使应力作用加上特定的环境, 应力腐蚀的速率就会十分显著, 加工所产生的应力腐蚀破坏有时也沿晶粒间隙进行, 因而产生多种因素混和的腐蚀现象。应力腐蚀可以用后加工(如珠击法)、材料改良(添加合金元素)或阴极保护等方法来抑制。

### 8. 有机气氛腐蚀

在一定条件下, 某些油漆、塑料、橡胶、绝缘材料、黏合剂以及木材等非金属材料挥发的有机物气氛对金属(包括金属镀层)的腐蚀称为有机气氛腐蚀。这种腐蚀通常在金属零件和某些非金属材料共处于密封或半密封的设备中或者通风不良的条件下发生, 这可能与有机气氛需要积累到一定浓度有关, 是电子设备、仪器仪表中一种常见的腐蚀现象。有机气氛腐蚀这一定义不包括工业大气中各种腐蚀性气体对金属的腐蚀作用。

#### (1) 腐蚀气氛与腐蚀材料

已经证实, 这些非金属材料释放的腐蚀气氛主要是甲酸、乙酸等低分子脂肪酸、醛、氨等物质。试验结果表明, 油性清漆, 以干性植物油或半干性植物油为主改性的树脂漆, 均可产生不同程度的气氛腐蚀, 其腐蚀程度有随含油量增大而增加的趋势。用能够产生有机气氛腐蚀的油漆

加工的绝缘材料,如黄漆绸、黄漆布等,同样具有显著的气氛腐蚀倾向。

不同种类塑料的气氛腐蚀性表现出很大差别。酚醛塑料对低碳钢、锌、铜、铝、镉具有明显的气氛腐蚀性,其腐蚀作用来自酚醛树脂聚合时残留下的甲醛以及固化剂六次甲基四胺分解出的甲醛及氨。以木粉作填料时,腐蚀更为严重,因为在潮湿条件下,木粉水解能释放出甲酸和乙酸。氨基塑料造成气氛腐蚀的因素与酚醛塑料相同。

其他种类的塑料、橡胶、油脂和黏合剂等非金属材料,由于组成成分和加工方法不尽相同,表现出不同的气氛腐蚀行为,有的很重,有的很轻微甚至基本无腐蚀性。从试验结果看,凡是能够挥发出一定量低分子脂肪酸、醛、酚类气氛,以及硫化氢、氨等物质的材料,都会造成某些金属或金属镀层的不同程度的腐蚀。

#### (2) 有机气氛腐蚀影响因素

① 金属对气氛腐蚀的敏感性。在常用的金属材料和金属镀层中,镀锌层、镀镉层、碳钢、镁合金、多种青铜、黄铜、铅等,都是对有机气氛腐蚀十分敏感的材料。镀锌层对有机气氛腐蚀非常敏感,即使经过钝化处理也不能给予可靠的保护。其气氛腐蚀产物呈灰白色疏松粉末状,覆盖在表面,俗称“白霜”腐蚀。一些阴极性镀层如镍、铬、锡,本身虽无明显腐蚀倾向,但因镀层有微孔,在可能发生气氛腐蚀的环境中,对钢铁基体没有保护作用。贵金属如银、金只是对某些含硫材料如一些橡胶、腻子等非常敏感而很快发生气氛腐蚀。而锡、不锈钢则无明显的气氛腐蚀倾向。

② 腐蚀气氛浓度。有机气氛腐蚀需要有机气氛积累达到一定的浓度。

③ 相对温度。环境温度升高,气氛腐蚀程度加剧。

#### (3) 防止有机气氛腐蚀的方法

① 不使用能够挥发腐蚀性有机气氛的非金属材料,对塑料、涂料应采用彻底的固化和干燥工艺。

② 尽量使用无气氛腐蚀倾向的金属和金属镀层。

③ 保持密封设备内部或包装容器内部环境的干燥,使空气湿度低于发生腐蚀的临界相对湿度。

④ 对锌、镉等镀层在钝化处理后再涂敷保护性清漆,以提高其抗有机气氛腐蚀的能力。

### 4.3.2 金属防蚀的方法

#### 4.3.2.1 选用耐腐蚀材料

如前所述,发生腐蚀的主要原因包括电化学及化学作用,因此如果能阻止或抑制腐蚀的发生,诸如,选用耐蚀或适当处理的材料,使用涂料、腐蚀抑制剂将金属表面和其环境隔开,大量使用阴极防蚀以防止化学电池的发生,或是使阳极形成钝化层以保护其内部金属,均是有效的方法。

选择适当的材料是防蚀的基本方法。例如,在适当成本考虑下使用不锈钢或是其他耐蚀材料。但是这样的材料也并不一定能防止腐蚀的发生,例如,沃斯田铁系的不锈钢料如果经由焊接或高温缓冷的过程,到达 425℃ 附近,会在其晶界析出碳化铬,此区域将因缺乏铬而迅速发生腐蚀(此种现象又称为不锈钢敏化现象)。因此,如果使用在这样的场合,配合适当的处理是必要的。

##### 1. 选材原则

从防腐蚀角度出发,选材应该遵循以下原则:

(1) 环境因素和腐蚀介质是选材必须明确的条件

材料的耐蚀性能,与所接触的介质有密切的关系。选材时,首先要知道环境中腐蚀介质的种

类、腐蚀强度、pH 值以及影响腐蚀性的诸如环境温度、湿度变化、应力等各种因素。以此作为选材的主要依据。

例如,在大气腐蚀条件下,温度和污染介质含量是影响金属腐蚀速度的两个主要因素。大气中含有氨时,会使铜和铜合金的腐蚀加剧,而对镍却不产生影响。大气中含有大量硝酸盐时,Cu-Ni-Zn 合金易产生腐蚀疲劳,而不锈钢则无此弊病。又如,在海水腐蚀条件下,高合金钢、钛和钛合金、白铜等均为优越耐蚀材料。

在某些条件下,可以考虑选用非金属材料代替金属材料,以求得更好的防蚀效果。非金属材料种类很多,如塑料、玻璃钢、橡胶、陶瓷等,只要使用得当,都可作为电子设备的防蚀材料。

目前,在电子设备中,广泛利用工程塑料制造机箱、面板、旋钮、支架、手柄等一般构件和齿轮、链轮、蜗轮、蜗杆等耐磨传动机件。

#### (2) 根据对保护程度的要求选择材料

对于那些一旦发生腐蚀则会带来严重后果、可靠性要求很高以及长期运行而又无法更换或维修的关键性零、部件,在不宜采取其他防腐措施的情况下,应该选用高耐蚀性的材料。而对非关键性部件则可采用耐蚀性较低的材料,并辅以其他防腐措施,可获得较好的经济效果。

#### (3) 还要考虑与之相应的防护措施

一种金属材料加上适当的防护措施可以组成良好的耐蚀体系。选材时,应注意该种材料可采取何种防护措施,以及材料与防护措施形成的体系所能达到的防腐蚀效果。铸件在冷却过程发生的偏析现象会形成局部伽凡尼电池作用、材料经过冷加工所产生的应力腐蚀现象,都必须经由均质化退火、弛力退火等处理来防治腐蚀的发生。

#### (4) 注意材料之间的兼容性

不同金属相互接触有可能造成电偶腐蚀。在一定条件下,非金属材料可导致金属或镀层产生气氛腐蚀。选材时必须充分注意避免不同材料之间的相互影响。

#### (5) 注意材料的可加工性

对选定的材料还要考虑其加工、焊接性能,要注意材料加工后是否会降低其耐蚀性能。

### 2. 大气环境中的选材

在大气环境中,作为电子设备的结构材料通常以钢铁(铸铁、普通碳钢、合金钢)、铝合金为主,并进行适当的表面处理以增强其防腐能力。常用金属材料的防腐处理有以下几种:

(1) 碳钢、低合金钢和铸铁可以用金属镀层或油漆涂覆层保护。由于工作条件的限制不能采用保护层时,应采用油封防锈。

(2) 铝及铝合金采用电化学氧化处理或化学氧化处理,铸造铝合金采用油漆涂层保护。

(3) 铜及铜合金在大气中容易变色。当变色会影响其导电性能或外观要求时,可根据不同的使用条件和使用要求,采用酸洗、钝化处理、金属镀层或油漆层加以保护。

(4) 锌合金制造的零件,可以采用磷化、钝化、金属镀层或油漆层加以保护。

(5) 镁合金制造的零件,可以采用阳极氧化或化学氧化处理并涂覆油漆层保护。

### 3. 海水环境中的选材

对大型海洋工程,通常采用价格低廉、制造方便的低碳钢和普通低合金钢,并辅之涂料和阴极保护措施。对强度要求高时,可采用低合金高强度钢。对飞溅区部位,由于腐蚀严重,可采用特种涂料或金属喷涂层保护。

环境腐蚀条件比较苛刻、普通钢铁材料难以满足防腐蚀要求、材料用量又不很大时,可采用高耐蚀性材料,如耐海水不锈钢、铜合金等。特别是可靠性要求很高时,应选用镍基合金和钛合金。

#### 4. 有应力时的选材

在有拉伸应力存在的条件下,应尽量选用在给定环境中尚未发生过应力腐蚀破裂的材料,或对现有可供选择的材料进行试验筛选,择优使用。

##### 4.3.2.2 表面涂覆

表面涂覆是电子设备最常用的金属防腐蚀方法。表面涂覆就是在零件表面涂覆一层耐蚀性较强的金属或非金属覆盖层,将基体金属与腐蚀介质隔离开,以达到防腐蚀的目的。

表面涂覆既可起到保护金属不受腐蚀作用,又可对零件进行装饰,还能满足零件的一些特殊要求,如有些表面涂覆可以提高元器件及设备的电气性能。

根据构成覆盖层的物质不同,表面覆盖层可分为三类:

##### 1. 表面覆盖金属层

良好的金属涂层,不但可以延长结构寿命,相对于有机涂层必须定期维修的缺点,金属涂层更具有成本经济、经年不必维修等特点。例如,采用热浸镀锌构材或钢索的桥梁,就可以耐用数十年以上,美国 Brooklyn 桥上的镀锌钢索使用就超过百年。

##### (1) 金属覆盖层的分类

##### ① 按镀层组成成分。

- a. 单金属电镀。应用较广的镀层有锌、镉、铜、铬、锡、镍、金、银等。
- b. 合金电镀。二元合金电镀常用的有锡-铅合金、锌-镍、锌-钴、铜-锡等;三元合金电镀常用的有铜-锡-锌、锌-镍-铁等。
- c. 复合电沉积。电镀层中嵌入固体颗粒形成复合镀层。

##### ② 按获取镀层方式分。

- a. 防护性电镀。主要作用是防腐蚀。如镀锌。
- b. 装饰性电镀。不仅能够防止腐蚀,而且能赋予金属零件装饰性外观。此类镀层大多为多层。先镀以与基体金属结合牢固、耐蚀性强的“底层”,再镀具有装饰性的“表层”,甚至还有“中间镀层”,如镀金、银、铜、镍、装饰铬。
- c. 功能性镀层。主要作用是赋予金属零件表面以某种特殊功能。耐磨性电镀如镀硬铬;提高可焊性电镀如镀锡;增强导电性如镀银、镀金。

##### ③ 根据镀层金属与基体金属之间的电位关系分。

- a. 阳极性镀层。如果镀层金属的电极电位比基体金属的电极电位低,这类镀层称为阳极性镀层。完整的阳极性镀层对基体金属具有机械保护作用,当镀层有缺陷(针孔等)而与基体形成微电池时,镀层将为阳极,对基体金属产生电化学保护作用。

阳极性镀层在使用环境中必然受到一定程度的腐蚀,它对基体金属防护的能力取决于镀层厚度。选用阳极性镀层时,应该根据使用环境、预期的保护寿命等因素确定镀层厚度。

在下列用途上不宜选用阳极性镀层:需要长期保持某种特殊的状态或性能,如保持长期光亮、优良的导电性等;腐蚀产物可对机械性能或其他性能有不良影响,或者腐蚀产物可能成为有害杂质造成污染。

- b. 阴极性镀层。如果镀层金属的电极电位比基体金属电极电位高,则为阴极性镀层。完整而又致密无孔的阴极性镀层对基体金属也有机械保护作用,但在下列情形下,不宜选用阴极性镀层:由于重量原因(如飞机上)或其他原因,使镀层的最大厚度受到限制;镀层有可能受到物理性损坏,需要经常维修的零件,因为镀层有破损后,会加速基体金属的腐蚀。

##### (2) 获得金属覆盖层的工艺方法

① 电镀。借助于电解作用，在金属制件表面上沉积金属镀层的方法。电镀法获得的镀层金属纯度高，与基体结合牢固，节省镀层金属。通过改变和控制电镀溶液的组成、电流密度、通电时间等因素，可在很大范围调整镀层厚度和改善镀层质量。通过电镀方法可以获得单金属镀层，如铜、镍、铬、锡、银、金等，也可以获得合金镀层，如铜锡、锡铅等，包括防护、装饰及多种功能性镀层。

② 化学镀。在不通电的情形下，利用氧化还原反应，使盐溶液中的金属离子在工件上析出，形成金属镀层的方法。化学镀层具有镀层均匀、致密、针孔少等优点，而且工艺设备较简单，不需要电源。适用于难以电镀（如结构形状复杂零件的内表面）或不能直接电镀（如非金属材料）的零件，但镀层较薄。目前化学镀的镀层有铜、金、银等。

③ 热喷涂。将丝状或粉状金属放入喷枪中，借助高压空气或保护气氛，使被火焰或电弧熔化的金属成雾状喷到被保护金属上，形成覆盖层，此法也称为金属喷镀。用于防护目的的金属喷涂层有锌、铝、铅等。其他如不锈钢、各种合金以及陶瓷等喷涂材料，主要作为功能性镀层使用，厚的喷镀层还可用来修复磨损或损坏的零件。热喷涂法不受被镀工件大小和形状的限制，可用于大型设备。喷镀层的孔隙率较大，需进行孔隙封闭处理。

④ 热镀。将被保护的金属制品浸渍在熔融金属浴中，一定时间后取出，或以一定速度从熔融金属浴中通过，使制件表面形成一层金属覆盖层。选用的液态金属一般是低熔点、耐蚀、耐热的金属，如锌、锡、铅等。与电镀法相比，热镀层较厚，与基体金属结合牢固；在相同环境中，其寿命较长。

⑤ 渗镀。将被镀金属制件置于含镀层金属，或它的化合物的粉末混合物及蒸汽等环境中，使由于热分解或还原等反应而析出的镀层金属原子，在高温下扩散到制件金属中，在其表面形成合金化扩散层。因此，这种方法也称为表面合金化。渗镀层不仅有良好的耐蚀性，还可改善基体金属的其他物理化学性能。渗镀层与基体结合牢固，一般不会因温度急剧变化而脱落。最常见的渗镀层有锌、铝、铬、硅、硼等二元和三元渗镀层。

⑥ 真空镀。包括真空蒸镀、溅射镀和离子镀，这些方法都是利用材料在高真空条件下的气化而在制件表面形成覆盖层。真空镀无污染，适合于多种金属和非金属基材，工艺简单。但有镀层薄、设备费用高、镀件尺寸受限制等缺点。

### （3）金属镀层的基本要求

- ① 镀层金属在环境介质中耐蚀性良好。
- ② 镀层与基体金属、镀层与镀层之间，应有良好的结合力。
- ③ 镀层应具有良好的机械物理性能，如光亮度、硬度、导电性等。
- ④ 镀层完整，空隙率小、结晶细致、平整、厚度均匀。
- ⑤ 有一定的厚度和均匀性。

### （4）各类镀层的特性及作用（见表 4-1）

表 4-1 各类镀层的特性及作用

镀层系列	镀层类别	特性和用途	备 注
防护装饰性镀层	铜、镍、铬及铜-镍-铬复合镀层	镀铜层结构细密，结合力好，容易抛光。在大气中易受腐蚀介质的侵蚀。用作铜-镍-铬组合镀层的底层。镀覆电器灭弧栅片，印刷电路和电铸模等。镀镍层外观好，机械性能和耐蚀性能均优良。但镀层多孔，容易产生针孔腐蚀。不同含硫量的双层镍、三层镍能有效地提高防护性能。常用作防护-装饰镀层，其厚度要足以防止有针孔。在铜-镍底层上镀一层 $0.5\mu\text{m}$ （超过此厚度易产生裂纹）的铬，可获得美丽的装饰外观。采用微裂纹镀铬或微孔镀铬工艺，可提高整个组合镀层的防护性。	海南大气腐蚀试验表明：铜-镍-铬组合镀层达 $45\mu\text{m}$ 以上，可保持三年而基体金属不产生锈蚀。

续表

镀层系列	镀层类别	特性和用途	备注
防护装饰性镀层	铜锡合金镀层	含锡 10%~15%的低锡青铜,具有良好的抛光性能,镀层孔隙小,耐蚀性好。含锡 40%~50%的高锡青铜,外观呈银白色;硬度介于镍与铬之间;经抛光后,其反射率仅次于银;在大气中不易失去光泽;能耐弱酸,弱碱和食品中有机酸的腐蚀;同时具有良好的导电性和焊接性。但是镀层性脆,不能承受敲打或变形	
	锌铜-合金镀层	含铜 25%左右的合金,有银白色光泽,成本低,保护好。对铜铁来说,属阳极性镀层。在潮湿环境下,外观不如铬稳定,容易产生白色腐蚀点。套铬后作轻工业产品,一般用作户内产品的防护-装饰镀层	在工业大气条件下,锌铜合金的防护-装饰性能比镀镍层好
	锌-铁-镍合金及锌-铁合金镀层	这两种合金有银白色外观,在潮湿环境下容易产生白色腐蚀点。可从焦磷酸盐电解液中镀取。套铬后,用来代替锌-铜合金镀层,作一般户内产品防护-装饰用	
防护装饰性镀层	金、金合金镀层	镀金层,或含金 75%~80%的合金镀层(其余为银、镍或铜等),作首饰等贵重产品装饰用	镀金不宜用银作底层
	黑镍镀层	是一种黑亮耀目的镀层,镀层很脆,弯曲时容易起皮或剥落,厚度不能超过 1.5 $\mu\text{m}$ 。作仪器装饰用	
	锡-镍合金镀层	含锡 65%的合金,外表像光亮的镍或铬,微带玫瑰色,有极高的耐蚀性能和抗暗性能。镀层硬度介于镍、铬之间;延性好;内应力很小。可代替铜-镍-铬镀层,作防护-装饰用	
高硬度耐磨镀层	硬铬	硬铬镀层是表所列诸镀层中硬度最高的,能提高工作使用寿命。修复曲轴、齿轮、活塞环	镀硬铬的基体金属必须有足够的硬度
	硬镍化学镀镍	硬度略低于硬铬。沉积速度快,对于复杂零件能获得较均匀的镀层,除氢较容易;耐磨和耐腐蚀性好;镀层均匀;硬度随含磷量增加而提高,如果在 400 $^{\circ}\text{C}$ 下,热处理 1h,可提高硬度一级。用作耐磨、耐腐蚀的镀层	
	镀铬	耐磨、耐腐蚀,接触电阻稳定。用作电器和电子工业比较重要的触头镀层	价格昂贵
	镀铁	价格低廉,镀层软,容易机械加工。电镀后经渗碳、渗氮处理可提高硬度。镀层厚度可达 1mm 以上。修复磨损零件和加尺寸不足的零件	
	镀锡镍合金	硬度介于镍与铬之间,具有容易钎焊的特点。用于印刷线路等	
高导电、易钎焊镀层	金、金合金镀层	金导电性好,镀金作焊接用得最广泛,但只能用 10 $\mu\text{m}$ 以下的箔金,否则,焊接时会生成金锡中间层,使连接点发脆和润滑性下降。为了克服纯金耐磨性差的缺点,通常用合金代替纯金。但合金比纯金接触电阻大五倍。此外金合金的钎焊和防护性不如纯金好	
	镀银层	银电导率和反射系数很高,镀层软,耐磨差。在大气中易受硫化物作用变暗,接触电阻增加。在与塑料、陶瓷组装时,镀层会向绝缘层迁移,甚至造成短路	镀银后,需进行抗暗处理
	镀锡层	锡性质柔软,钎焊性好。对硫化物也很稳定。存放时间较久时,钎焊变难,镀后浸入热油中进行流平,可延长存放时间。广泛用于保护铜导线和导电零件,防止氧化或硫化。也用于需要焊接的零件	
	锡镍合金镀层	锡镍合金镀液的均镀能力特别好,耐磨、耐腐蚀性好	
	锡锌合金镀层	锡镍合金有极好的钎焊性和耐蚀性。一般用于需要钎焊的铜制零件,如电信、电子零件、线缆接头和继电器组件等	
耐磨镀层	铅基合金,锡基合金	铅基合金镀层耐疲劳性能比锡基合金好,但耐磨性和耐蚀性相反。当负荷不大,耐疲劳性能要求不高时,用锡基合金,该合金使用寿命长	
	银铅铜合金镀层	用于高速和高负荷的轴承,其使用寿命比铜、铅合金高 10 倍	
	镀铜层	铜的熔点 155 $^{\circ}\text{C}$ ,扩散能力好,选择适当的基体金属镀铜,用扩散方法可获得各种用途的含铜合金镀层,例如,在银轴承上镀铅和铜,然后加热扩散,可形成适合于作飞机发动机轴承用的银-铅-铜合金镀层	
磁性镀层	镍钴合金镀层	磁性范围广,用作录音带和电子计算器的磁性镀层,亦可铸成磁性材料	
	镍铁合金镀层	纯镍和铁 20%的镍铁合金,适用于低矫顽力的磁性镀层	加入少量磷,可作高矫顽力镀层



① 镀锌层。锌的标准电位为 $-0.76\text{V}$ ，在一般大气环境中，由于表面生成具有良好保护性的碱式碳酸锌而比较稳定，为钢铁提供了一种屏障层。镀锌层对基体的保护寿命通常与其厚度成正比。镀锌层在室内大气中的保护寿命为室外的5倍以上。实际上，在潮湿和腐蚀性较严酷的大气环境中，碳钢在镀锌后还需要涂防潮涂料才能获得良好的防蚀效果。

锌镀层的外观呈青白色，易溶于酸，溶于碱，是典型的两性金属。锌在干燥空气中几乎不发生变化，锌腐蚀的临界湿度大于70%，因此在潮湿大气中能与二氧化碳和氧作用生成一层主要由碱式碳酸锌组成的薄膜，这层膜有一定的缓蚀作用。

有工业废气污染的大气中，锌镀层的耐蚀优于镉镀层，在海上或海水中则相反。锌易受氯离子浸蚀，故在海水中不稳定。

锌镀层经铬酸盐钝化之后，耐蚀性可提高6~8倍。故镀锌钝化处理是必不可少的步骤。在钝化膜上进行有机染色，可作低档产品的防护-装饰镀层。锌镀层的使用温度不得超过 $250^{\circ}\text{C}$ ，在此温度上锌结晶组织变形，发脆，耐蚀性下降。有耐蚀、耐热要求的零件宜用Zn-Ni合金层。

用不同方法获得的镀锌层各有其特点及适用范围。

电镀法获得的镀锌层厚度容易控制，而且比较均匀，主要用于大气环境，在电子设备中应用最为广泛。为了提高电镀锌层的耐蚀性，需要进行钝化处理。采用不同的钝化工艺，可得到翠绿色、彩虹色、金黄色、黑色、白色的钝化膜，具有一定的装饰作用。

热镀锌层具有良好的黏附性，可以满足加工成型的要求，在天然水和自然环境中具有优良耐蚀性。主要用途是制造热镀锌钢板（带）、钢管、钢丝以及一般零件的防护性镀层。

渗镀锌层比其他镀锌层具有更好的防护效果，而且有较高的硬度和耐磨性，还可改善钢的耐腐蚀疲劳性能以及提高钢在含硫化氢热气流中的耐蚀性。主要用于弹簧、紧固件以及需要严格控制尺寸误差的零、部件。

喷镀锌层适合于无法移动的大型结构的防护。

为降低镀锌层厚又能提高耐蚀能力，国内外采用如下两种措施：一是提高钝化膜的质量，如用蓝色、绿色、军绿色、黑色钝化代替常规的彩虹色钝化膜，尤以军绿化钝化膜耐蚀性最好；二是以较薄的含铁0.3%~0.6%的Zn-Fe合金，或含镍6%~10%的Zn-Ni合金代替纯锌镀层，耐蚀性能提高3倍以上。

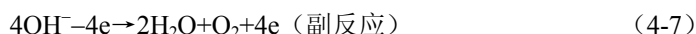
② 镀镍层。镍是银白色微黄的金属，具有铁磁性，密度 $8.9\text{g}/\text{cm}^3$ ，熔点为 $1453^{\circ}\text{C}$ 。金属镍易溶于稀硝酸，难溶于盐酸和硫酸，在硝酸中处于钝化状态。在空气中镍与氧作用，表面迅速生成一极薄的钝化膜，能抵抗大气、碱和一些酸的腐蚀。

镀镍时，阴极为待镀零件，阳极为纯镍板，在阴阳极分别发生如下反应：

阴极（镀件）：



阳极（镍板）：



镍的标准电极电位为 $-0.25\text{V}$ ，镀镍层是钢铁的阴极性镀层，可以通过电镀、化学镀等方法获得。

在电镀镍的工艺中，通过不同的镀液成分，可获得暗镍、黑镍等多种镀镍层。镀镍层在大气环境下，由于表面生成钝化膜而非常稳定。但镀镍层孔隙率高，薄的镀镍层不能单独用于防护，通常与铜形成组合镀层，来达到既能防护又具有装饰效果的双重目的。黑镍镀层具有很好的吸光

性能, 常用于光学仪器和摄影设备零部件的镀层。利用其对太阳能的辐射有较高的吸收率, 可用于太阳能集热板。镀镍层在功能性方面, 主要用于修复被磨损、被腐蚀的零件。

化学镀镍层在大气暴露试验、盐雾加速试验中表现出的耐蚀性显著地优于电镀镍层。化学镀镍层对石油和天然气环境等有优良的抗蚀性, 可代替不锈钢和纯镍用于石油、化工领域。化学镀镍层还具有高硬度和优良的耐磨性, 可作为耐磨镀层。在计算机工业, 主要用于硬盘片铝镁合金上化学镀镍, 保护铝合金不变形、不受腐蚀。在电子工业, 作为低电阻温度系数及焊接性能良好的镀层使用。

③ 镀铬层。铬是一种微带天蓝色的银白色金属, 有很强的钝化性能, 在大气中很快钝化, 具有贵金属的性质, 铁零件镀铬层是阴极镀层。铬层在大气中很稳定, 能长期保持其光泽, 在碱、硝酸、硫化物、碳酸盐以及有机酸等腐蚀介质中非常稳定, 但可溶于盐酸等氢卤酸和热的浓硫酸中。

镀铬层具有极好的抗蚀、保持光泽的能力, 硬度高, 耐磨性好, 反光能力强。有较好的耐热性。在  $500^{\circ}\text{C}$  以下光泽和硬度均无明显变化; 温度大于  $500^{\circ}\text{C}$  开始氧化变色; 大于  $700^{\circ}\text{C}$  才开始变软。广泛用作防护-装饰性镀层的外表层和功能性镀层。

a. 装饰性镀铬。要求镀层光亮; 镀液的覆盖能力要好, 零件的主要表面上应覆盖上铬; 镀层厚度薄。防护-装饰镀铬广泛用于汽车、家用电器、仪器仪表、机械、船舶舱内的外露零件等。经抛光的铬层有很高的反射系数, 可作反光镜。

近年来发展了一种高耐蚀性的防护装饰体系, 是采用双层镍或三层镍与不连续铬组成的镀层体系。双层镍由半光亮镍镀层和亮镍镀层组成, 三层镍由半光亮镍镀层、高硫镍镀层再加亮镍镀层形成。由于亮镍和高硫镍镀层的含硫量比半光亮镍的含硫量高, 因而其电位比半光亮镍电位负, 当腐蚀介质通过铬层到达镀镍层时, 亮镍或高硫镍就是腐蚀电池的阳极而先腐蚀, 从穿透型腐蚀改变为横向腐蚀, 从而延缓了整个腐蚀速度。微不连续铬包括微孔铬和微裂纹铬镀层, 这类镀铬层由于具有众多的微孔或裂纹, 暴露出的镍阳极面积就大, 单位面积上的腐蚀电流就大为降低, 因而腐蚀速度大大减缓。

b. 硬铬。硬铬的维氏硬度达到  $900\sim 1200\text{kg/mm}^2$ , 铬是常用镀层中硬度最高的镀层, 可提高零件的耐磨性, 延长使用寿命。

c. 乳白铬镀层。在较高温度 ( $65\sim 75^{\circ}\text{C}$ ) 和较低电流密度 ( $20\pm 5\text{A/dm}^2$ ) 下获得的乳白色的无光泽的铬称为乳白铬。镀层韧性好, 硬度较低, 孔隙少, 裂纹小, 色泽柔和, 常用于仪器面板等镀铬。

d. 松孔镀铬。通常在硬铬之后, 用化学或电化学将铬层的粗裂纹进一步扩宽加深, 以便吸藏更多的润滑油脂, 提高其耐磨性, 这就叫松孔铬。松孔镀铬层应用于受重压的滑动摩擦件及耐热、抗蚀、耐磨的零件, 如内燃机汽缸内腔、活塞环等。

e. 黑铬。在不含硫酸根而含有催化剂的镀铬中, 可镀取纯黑色的铬层。以氧化铬为主成分, 故耐蚀性能优良, 应用于航空、光学仪器、太阳能吸收板及日用品之防护-装饰。

④ 镀铜层。呈粉红色, 质柔软, 具有良好的延展性、导电性和导热性, 易于抛光, 经适当的化学处理可得古铜色、铜绿色、黑色和本色等装饰色彩。镀铜易在空气中失去光泽, 与三氧化碳或氯化物作用, 表面生成一层碱式碳酸铜或氯化铜膜层, 受到硫化物的作用会生成棕色或黑色硫化铜, 因此, 装饰性的镀铜层需在表面涂覆有机覆盖层。

镀铜层可以用电镀、化学镀、热喷涂等方法获得。但在电子设备生产工艺中, 以电镀和化学镀为主。化学镀铜工艺主要应用于非金属材料的表面金属化, 如电子设备印制板的孔金属化, 陶瓷、塑料表面镀铜等。

对钢铁而言,铜是阴极性镀层,且多孔。暴露在大气中的镀铜层很快变得晦暗而失去光泽。因此,电镀铜一般很少单独用于防腐蚀目的,主要作为功能性(如导电)镀层,或是与其他电性更正的金属镀层(主要是镍和铬电镀层)形成组合镀层,镀铜层作为底层使用。

⑤ 镀镉层。镉是银白色有光泽的软质金属,其硬度比锡硬,比锌软,可塑性好,易于锻造和辗压。镉的化学性质与锌相似,但不溶解于碱液中,溶于硝酸和硝酸铵中,在稀硫酸和稀盐酸中溶解很慢。

在一般大气和工业大气条件下,镀镉层的防护性能不如镀锌层好,而在海洋大气和高湿环境中,镀镉层有优良的耐蚀性,防护性能则优于镀锌层。因此,在航空、航海环境中工作的电子设备多采用镀镉层。但镉蒸气和镉盐都有毒,而且价格昂贵,所以通常采用镀锌层和合金镀层来取代镀镉层。镀镉层在镀后也需要进行钝化处理和除氢处理。

⑥ 镀锡层。锡具有银白色的外观,原子量为 118.7,密度为  $7.3\text{g/cm}^3$ ,熔点为  $232^\circ\text{C}$ 。锡具有抗腐蚀、无毒、易焊、柔软和延展性好等优点。

镀锡的方法有电镀、热浸镀、喷镀和化学镀,但以电镀法为主,其次是热浸镀锡。各种方法获得的镀锡层都有一定孔隙,其中以电镀及热浸镀的镀层孔隙率最小。镀锡层对于钢铁在一般条件下为阴极性镀层,只有在镀层无孔隙时才能有效地保护基体。但在密闭条件下,在有机酸介质中,锡的电位比铁低,为阳极性镀层,具有电化学保护作用。镀锡层对于铜及铜合金为阳极性镀层,在水溶液中镀锡层优先腐蚀起到牺牲阳极的作用。

镀锡层化学稳定性高,在大气中耐氧化、不易变色,与硫化物不起反应,导电性好,易钎焊。电子元器件的引线、印制电路板镀锡作为可焊性镀层,也以锡代银作为导电镀层。铜导线镀锡除提供可焊性外,还有隔离绝缘材料中硫的作用。机械工业中镀锡层作为密合和减磨镀层。锡和锌、镉镀层一样,在高温、潮湿和密闭条件下能长成“晶须”,这是镀层存在内应力所致。小型化电子元器件需防止晶须造成短路事故。电镀后用加热法去除内应力可避免这一特性。

热浸镀锡的主要用途是制造镀锡钢板和镀锡铜丝。低碳钢带上双面镀薄层锡即为马口铁,作为食品包装及轻便耐蚀容器的主要材料。

⑦ 镀铝层。根据金属电沉积理论,不可能从水溶液中实现铝离子的还原。因此不能利用普通电镀方法在金属表面获得镀铝层。但可以通过热镀、热喷涂、渗镀和真空镀来获得。

在钢板上热镀铝主要作为防蚀镀层使用。所得到的镀铝层具有双层结构,其表层成分几乎是纯铝;次层为铝铁合金。镀铝层表面有一层坚实而致密的膜,保护镀层和基体金属不受腐蚀。镀铝钢板具有耐大气腐蚀、耐海洋和潮湿环境腐蚀的优异性能,其在大气环境中的耐蚀性是镀锌钢板的 3~6 倍;在硫化氢中的耐蚀性远远高于各种高铬钢。镀铝钢板兼有钢基体的力学性能和镀铝层的耐蚀性能,是一种耐腐蚀、耐冲击和可以焊接的复合材料。

在含有二氧化硫的大气中,铝喷涂层用于钢铁材料有明显的耐蚀性。

在钢铁上渗铝所得到的的是铁铝合金层。渗铝钢材具有优良的抗高温氧化性,对硫化氢气体有良好的耐蚀性。渗铝主要用于提高钢铁零件耐热、耐腐蚀寿命,是目前提高钢材耐硫化物腐蚀的最有效手段之一。

⑧ 镀银层。银有良好的导热性和高的电导率,焊接性能好,有极强的反光能力。对于常用金属而言,银是阴极性镀层。电子工业使用镀银层作为导电性镀层和可焊性镀层,也利用其优良反光能力,作为探照灯、反光镜等特殊设备的镀层。

镀银零件的基体材料一般都是铜和铜合金,在钢铁、镍合金等基材上镀银,必须先镀一层铜。镀银层遇到大气中的二氧化硫、硫化氢等介质时,表面很快生成硫化银膜,呈褐色或黑褐色,这

种现象称为“银的变色”。镀银层变色后严重影响其焊接性能和导电性能。因此为了提高其抗变色能力和抗蚀性，零件镀银后通常要进行镀后处理。常用方法有浸亮（光亮镀银不需要）、化学钝化或电化学钝化、镀稀有金属、涂覆有机覆盖层等。

⑨ 镀金层。金具有低接触电阻，导电性能良好，易于焊接，耐蚀性强，具有一定耐磨性。在电子工业广泛作为高可靠性的防蚀、电接触镀层。在银上镀金可防止银的变色。对钢、铜及其合金而言，镀金层为阳极性镀层，镀层的孔隙影响其防护性能。

⑩ 合金镀层。近年来，在电镀技术领域开发了一些耐蚀合金镀层，例如锌铁合金镀层、锌镍合金镀层、锌钴合金镀层、锡锌合金镀层等。这些合金镀层耐蚀性和防护性能都超过了镀锌层或镀镉层。热浸镀铝锌合金具有比镀锌板更优异的耐蚀性和抗氧化性。

#### （5）镀层的选择

镀层种类和厚度的选择，主要取决于下列因素：

- ① 零件的工作环境。
- ② 被镀零件的种类、材料和性质。
- ③ 镀层的性质和用途。
- ④ 零件的结构、形状和尺寸的公差。
- ⑤ 镀层与其互相接触金属的材料、性质。

#### 2. 表面覆盖化学膜

用化学或电化学方法在金属表面覆盖一层化合物（绝大部分是金属氧化物）的保护膜。常用的有磷化、发蓝、钝化、氧化等。

化学转化膜又称金属转化膜。它是金属或镀层金属表层原子与介质中的阴离子相互反应，在金属表面生成的附着良好的氧化膜和金属盐膜。在化学转化膜形成过程中，基体直接参加反应。常用的金属材料的化学转化膜工艺有钢铁材料的磷化和氧化，铝及其合金的阳极氧化、化学氧化、镁合金的氧化，铜及其合金的氧化、钝化等。

##### （1）氧化处理

① 钢铁的氧化处理。俗称发蓝，因为氧化处理后的零件表面生成的氧化膜呈蓝黑色而得名。现代工业上钢铁氧化采用高温型和常温型两种。

高温氧化处理是将钢铁零件浸入苛性钠溶液中，在高温下进行处理，所生成的氧化膜的主要成分是磁性氧化铁。膜层颜色取决于钢材成分、表面状态和氧化工艺规范。一般钢铁呈黑色和蓝黑色，铸钢和含硅较高的钢呈黑褐色。

常温氧化是在以亚硒酸盐、硫酸铜和磷酸盐为基本成分的溶液中，室温下进行处理。所生成的表面膜层成分较复杂。

无论是高温氧化还是常温氧化，所生成的膜层厚度均只有  $1\mu\text{m}$  左右，不影响零件的精度，有较大的弹性和润滑性，又无氢脆危险。但防护效果不如金属镀层，也不如磷化膜层。常用于机械、精密仪器、兵器和日用品的一般防护装饰。一些对氢脆很敏感的弹簧丝、细钢丝、薄钢片也常用氧化膜作防护层。为提高氧化膜的耐蚀性，钢铁氧化后需要在肥皂溶液或重铬酸钾溶液中填充处理，再经浸油处理。

② 铝及铝合金的化学氧化。铝及其合金在大气中能与氧作用，自然形成氧化膜。但由于氧化膜太薄、孔隙率大、机械强度低，因此不能有效地防止腐蚀。在实际应用中，通常利用人工方法使氧化膜加厚，变得致密，以提高铝及铝合金的耐蚀性，常用的方法是化学氧化和阳极氧化。

在适当的溶液中进行化学处理，使铝或铝合金表面生成稳定氧化膜、磷酸盐膜的过程称为化

学氧化。按氧化处理的溶液种类可分为碱性和酸性两类。按膜层性质可分为氧化膜、磷酸盐膜等。

化学氧化法所获得的膜层不耐磨,耐蚀性较低。但它具有较好的吸附能力,可作为良好的油漆底层。经化学氧化后再涂漆,可大大提高耐蚀性,是铝及铝合金的一种较好的防蚀方法,尤其适用于难以进行阳极氧化处理的大型零件或组合件。

在含磷酸、铬酸、氟化钠、硼酸的溶液中化学处理所获得的氧化膜,无色透明,导电性良好,适合于要求有一定导电性的铝或铝合金零件的表面防护。这种氧化方法又称化学导电氧化处理。

③ 铝及铝合金的阳极氧化。阳极氧化,是指将铝或铝合金作为阳极,在电解液中利用电解的方法,使其表面形成一种稳定的氧化膜的过程。阳极氧化也称为电化学氧化。通过阳极氧化而形成的氧化膜,可大大提高铝及其合金的耐蚀性和耐磨性,也可作为表面装饰用于其他目的。但由于氧化膜较脆,氧化处理后的零件不允许重复进行压力加工和承受较大的变形。

a. 阳极氧化的类型。按照电解液种类和膜层性质,铝及铝合金阳极氧化可以分为以下几类:

a) 硫酸阳极氧化。可获得无色透明氧化膜,硬度较高,容易着色。广泛用于在良好和一般大气条件下铝及铝合金的防护和装饰。

b) 铬酸阳极氧化。以铬酸为电解液,质软弹性高,用作油漆底层及与橡胶的粘接层。

c) 草酸阳极氧化。以草酸为电解液。可获得硬而厚的膜层,外观呈淡黄色。主要用作绝缘保护层,也常作日用品的防护装饰层。

d) 硬质阳极氧化。氧化膜层硬度很高。主要用于要求耐磨、耐热、绝缘的铝合金零件。

e) 瓷质阳极氧化。在特殊的电解液中,在硬铝的抛光面上获得浅灰白色光滑的氧化膜,不透明,外观类似瓷釉和搪瓷。硬度高,耐磨性好,可染色。用于仪器仪表零件的表面防护和日用品的表面装饰。

b. 氧化膜的着色。硫酸阳极氧化膜具有多孔性和化学活性,很容易进行着色处理。常用的着色方法有化学浸渍着色法和电解着色法。

化学着色法是将氧化后的零件立即浸入含有有机染料或无机盐的溶液中,染料分子或离子通过氧化膜的物理和化学吸附作用,存在于膜的内表层而显色。这种方法具有简单、成本低、色泽艳丽、装饰性好等特点。但耐晒、耐磨性差,不宜作室外和经常受摩擦零件的表面装饰,只用于室内装饰和小五金装饰。

电解着色法是在阳极氧化之后,再在含金属盐的电解液中进行交流电解,金属离子在氧化膜底部还原析出而显色。改变金属盐种类或电源波形,可方便地获得各种色调。膜的耐光、耐磨性很好,广泛用于建筑铝型材的装饰和其他功能用途。

c. 氧化膜封闭处理。氧化膜只有通过封闭处理后才具有充分的保护作用。封闭处理的作用是封闭或填充氧化膜的孔隙,目的是提高耐蚀性,提高抗污染能力。因此,氧化膜无论着色与否,都必须进行封闭处理。封闭处理的方法很多,如无机盐封闭、浸漆、电泳涂漆等。

d. 材质对氧化膜质量的影响。铝及其合金的成分和热处理状态对阳极氧化膜的外观和性能影响很大。对于外观要求高的装饰零件必须选择高纯度铝,经过化学或电化学抛光,再经硫酸阳极氧化,可获得无色、透明、性能良好的氧化膜。这种氧化膜可以着上各种鲜艳的色彩。选材时,一般希望铝合金具有较细的晶粒结构,以使氧化膜具有均匀的外观。

④ 镁合金的氧化处理。镁合金表面防护有化学氧化和电化学氧化(阳极氧化)两种方法。

在铬酸盐或氟化物等溶液中镁合金可获得化学氧化膜。根据溶液种类的不同,膜层可为黄色、深灰色、军绿色、棕色、黑色。镁合金可以在酸性或碱性溶液中,用电化学方法可获得外观为浅黄色、绿色或棕色氧化膜层。阳极氧化膜本身具有一定耐蚀性,有些厚膜还具有良好的耐磨性。

由于化学氧化膜薄而质软,电化学氧化膜质脆而多孔,故镁合金氧化处理除作装饰和中间工序防护外,很少单独使用。为提高镁合金的耐蚀性,一般在氧化之后都要喷涂油漆、树脂或塑料等有机膜层。

⑤ 铜及其合金的氧化处理。铜及铜合金可在碱性溶液中进行化学氧化和电化学氧化。获得的氧化膜为半光泽或无光泽蓝黑色,主要由黑色氧化铜组成,防护性能不高,质脆而不耐磨,不能承受弯曲和冲击,只适宜在良好条件下工作的零件的防护与装饰。氧化处理后涂覆透明涂料可提高防护能力。

### (2) 钢铁的磷化处理

将钢铁零件放入含有锌、锰、钙或铁等磷酸盐溶液中进行处理,在金属表面形成一层不溶于水的磷酸盐膜,此种工艺过程称为磷化处理,所生成的膜层称为磷化膜。磷化膜外观呈暗灰色或灰色,具有良好的吸附能力,经填充、浸油处理后,在大气中具有较好的抗蚀性。因此,通常与涂料或防锈油脂联合作为钢铁材料的涂覆层。磷化后基体金属的硬度、磁性等均保持不变。

磷化膜有良好的润滑性,常用作冷加工润滑膜。利用磷化膜较高的电绝缘性,可作为电动机及变压器用的硅钢片的电绝缘层。

### (3) 金属钝化(阳极保护)

钝化是一种金属特殊的现象,它产生的现象是使原来易受腐蚀的阳极金属反而受到保护。有些金属在特定的环境下,会有活性的转变,也就是原先活性很强的金属,腐蚀速率应随电极电位而增加,但是当阳极极化电位到达某一电位(称为钝化电位)时,腐蚀速率反而急速下降,形成钝化的现象,这种钝化的现象可以使原来容易受腐蚀的金属(如铁、镍、铬、钛),甚至在强酸中(如硝酸)也不会受到腐蚀。

相对于钝态而言,金属的正常溶解状态称为活化态。在金属活化区中,它的极化现象与一般非钝化金属相似,当电极间电位增加时,电流密度及腐蚀速率会随着增加,可是当电位达到临界电位,此时即进入钝化区,其间电流密度骤减,腐蚀速率急速降低,一般减少几个数量级。电位如果再持续增加,金属就会形成过钝化现象,此时腐蚀速率又会再度增加。利用金属钝化的特性,可以使其电位维持在钝化区内,达到特定金属的防蚀效果。

能够使金属从活化态转入钝态的介质称为钝化剂。除浓硝酸外,其他强氧化剂如硝酸钾、重铬酸钾、高锰酸钾、硝酸银、氯酸钾等也能引起金属钝化。甚至非氧化性介质也能使某些金属钝化,如镁在氢氟酸中、钼和铌在盐酸中。大气和溶液中的氧也是一种钝化剂。

阳极极化也可引起金属的钝化。某些金属在一定的介质中,当外加阳极电流超过某一定数值后,可使金属由活化状态变为钝态,称为阳极钝化或电化学钝化。

金属钝化是一种界面现象,它并没有改变金属的本性,只是使金属表面在介质中的稳定性发生了变化。关于钝化机理目前主要有两种观点,即成相膜理论和吸附理论。成相膜理论认为,当金属阳极溶解时,可以在金属表面生成一层  $30\text{\AA}$  ( $1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$ ) 致密的、覆盖得很好的固体产物薄膜。这层产物膜构成独立的固相膜层,把金属表面与介质隔离开来,阻碍阳极过程的进行,导致金属溶解速度大大降低,使金属转入钝态。吸附理论认为,金属钝化是由于表面生成氧或含氧粒子的吸附层,改变了金属/溶液界面的结构,使金属表面的反应能力降低了,因而发生了钝化。

使金属钝化防止金属腐蚀的主要方法有:

① 将易自钝化金属与钝性较弱的金属合金化,可使合金的自钝化趋势得到提高,耐蚀性明显增大。不锈钢具有很高耐蚀性的原因即在于此。

② 外加电流使金属发生阳极钝化,并将电位控制在稳定钝化区内,可防止金属发生活性溶

解,使金属得到保护。这种方法称为“阳极保护法”。

③ 利用钝化剂对有钝化趋势的金属进行处理,使其转入并保持钝态,可提高金属对大气的耐蚀性。此种方法在金属表面处理技术中称为“钝化处理”。

### 3. 表面覆盖有机膜

有机质覆层是由有机成膜物质构成的覆盖层,包括涂料及塑料、橡胶或沥青涂层等。涂料(油漆)是由有机媒质、不溶性颜料与其他物质等混和而成,媒质的成分可以是植物油、亚麻仁油或桐油,也可以是合成树脂和挥发性稀释剂的混合物。以流动状态涂覆在物体表面上,干燥后能附着于物体表面,并形成连续覆盖膜的物质。一般把能够形成有机覆盖层的化学材料统称为涂料。把涂料展平在物体表面称为“涂装”;涂装在物体表面的薄层涂料的固化过程称为“干燥”;干燥了的连续覆盖膜称为“漆膜”。

#### (1) 涂料的组成

涂料基本上由三大部分组成,即主要成膜物质、次要成膜物质和辅助成膜物质。

① 主要成膜物质。它包括油料和树脂两大类。用油作为主要成膜物质的涂料称为油性涂料;用树脂作为主要成膜物质的涂料称为树脂涂料。树脂可分为天然树脂和人造树脂。用油和一些天然树脂或合成树脂作为主要成膜物质的涂料称为油基涂料。

制造涂料的油料是桐油、亚麻油、豆油、蓖麻油。其中桐油和亚麻油属于干性油,在空气中能干燥结成树脂状膜;蓖麻油是非干性油,在空气中不能干燥结成树脂状膜。以油料作为主要成膜物质的油性涂料在硬度、光泽、耐水性能等方面远不能满足使用的要求。

最初在油漆中使用的都是天然树脂。但一般天然树脂的性能不能满足日益发展的需要,某些性能优良的天然树脂出产稀少。而人造树脂无论从品种、产量、性能、用途等各方面都大大超过了天然树脂。尤其是合成树脂的出现,使涂料的应用得到了迅速的发展。

② 次要成膜物质。它主要是颜料。作为颜料使用的物质大部分是各种不溶于水的无机物,包括某些金属及非金属元素、氧化物、硫化物及盐类,有时也使用某些有机颜料。根据颜料在涂料中所起的作用不同,可以分为防锈颜料、着色颜料和体质颜料。

防锈颜料是防腐蚀涂料的重要成分之一,具有优良的防锈能力,主要用在底漆中,可阻止金属的锈蚀,延长使用寿命,在对金属的防护作用中起着重要作用。按其防锈机理的不同,又可分为两类:一类是化学性防锈颜料,如锌粉等颜料是借助化学或电化学的作用起到防锈作用;另一类为物理性防锈颜料,如云母氧化铁等,其主要作用是提高漆膜的致密度,阻止阳光和水份的进入,增强涂层的防蚀效果。

着色颜料起着着色和遮盖物体表面的作用,而且还能提高漆膜的耐久性和耐磨性等。如金粉(黄铜)。

体质颜料又称填料,主要作用是增加厚度,加强漆膜体质,并能提高经久坚硬、耐磨、耐水等性能。常用的体质颜料为重晶石粉、重质碳酸钙、滑石粉等。

③ 辅助成膜物质。其主要作用是改变涂料的工艺性以及漆膜的物理、化学、机械性能,本身并不构成漆膜。辅助成膜物质包括两大类,即溶剂和其他辅助材料。

溶剂在油漆中起溶解成膜物质的作用,油漆干燥后,溶剂全部挥发。常用的溶剂有松节油、溶剂汽油等有机物质。近来涂料开发的重要方向是以水代替有机溶剂,这种涂料称为水溶性涂料。使用水溶性涂料对于防止大气污染和节约能源具有十分重要的意义。

涂料中辅助材料种类很多,按其功能来分主要有催干剂、固化剂、增塑剂、乳化剂等。

#### (2) 涂料的分类

在物体表面涂装涂料,大致有三个目的。保护性:防锈蚀、防潮湿等。装饰性:赋予物体美观,也包括标识作用。功能性:如杀菌防霉、隔音、防磁、调节传热性和导电性等。本书主要叙述对金属腐蚀起防护作用的涂料。

涂料的品种繁多,对这些涂料的命名,按有无颜料可分为色漆和清漆;按用途可分为汽车漆、船舶漆、木器漆、漆包线漆等;按使用目的可分为绝缘漆、防锈漆、防污漆、耐酸漆等;按其作用可分为底漆、面漆等。这些分类因使用方便,被作为涂料的基本名称广泛地使用。

在我国,涂料的分类以其主要成膜物质为基础,如果主要成膜物质为混合树脂,则以在漆膜中起决定性作用的一种树脂为基础。涂料分为油脂漆、沥青漆、氨基漆、硝基漆、纤维素漆、有机硅漆、丙烯酸漆、环氧漆和橡胶漆等。

### (3) 漆膜防护机理

① 屏蔽作用。金属表面涂覆涂料后,把金属和环境介质隔离开,这种保护作用可称为屏蔽作用。例如,在潮湿大气中只要把水和氧隔离,金属腐蚀就会停止。实际并非完全如此,所有的漆膜都不能使基体金属和环境介质绝对隔绝。因为主要成膜物质都具有一定的透气性。实际上,漆膜的屏蔽作用主要是加大了金属表面微电池两极间的电阻。

一般来说,充分干燥的均匀漆膜都有相当高的绝缘电阻,它可以导致电极反应的电阻极化。漆膜阻碍了氧到达金属表面,使阴极反应进一步极化。同时,由阳极反应释放的金属离子将因漆膜的存在而不易迁移,阳极反应将因此而发生浓差极化,使腐蚀过程的速度减慢。显然,漆膜对电解质离子的阻力越大,其绝缘电阻也越高,防腐蚀性能越好。

涂料中的一些惰性颜料如铁红、云母氧化铁、片状铝粉,能够封闭漆膜内部的渗透通路,可增强漆膜的屏蔽作用。例如,云母氧化铁呈鳞片状晶体结构,在涂层中平行排列,层层叠加,结果产生一种盔甲形的保护层,延长了腐蚀介质渗过漆膜到达金属表面的路程。

漆膜的屏蔽作用与成膜物质的结构、填料种类、涂装工艺以及漆膜厚度有关。为了提高漆膜的抗渗性,防腐蚀涂料应选用透气性小的成膜物质和屏蔽性大的固体填料,同时应增加涂覆层数,以使涂层达到一定的厚度而致密无孔。例如,当作为涂料主要成膜物质的高聚物的分子链上支链少、极性基团多以及体型结构的交联密度大时,则透气性较小。比较油基漆、乙烯类漆、醇酸漆、酚醛漆、环氧漆和氯化橡胶漆等漆膜的透水性和透气性可知,氯化橡胶漆膜对水和氧的渗透率最小。

② 缓蚀作用。防锈颜料利用化学性能起抑制腐蚀的作用。锌铬黄和其他可溶性铬酸盐颜料主要依靠对金属的钝化作用而产生防蚀效果。

③ 电化学保护作用。防锈颜料中广泛使用的金属粉末颜料是锌粉,可以对钢铁基体起阴极保护作用,而且锌的腐蚀产物是盐基性的氯化锌、碳酸锌,可填满漆膜的空隙,使膜紧密,而使腐蚀大大降低。

### (4) 涂装方法

① 刷涂和浸涂。刷涂,是利用漆刷将涂料涂覆于物体表面,设备简单,效率低,适用于干燥慢的涂料。浸涂法是将被涂物体放入涂料槽中浸渍,然后取出,让表面多余的涂料自然滴落,经过干燥后达到涂装目的。对于铸件气密性的封闭涂料和绝缘涂料的施工,可采用真空浸涂和压力浸涂。其特点是在特制的浸涂设备中造成真空或压力,以便使涂料更好地渗透到气孔或线圈、绕组之中,达到均匀完整的涂装目的。

② 空气喷涂。利用喷枪借助于压缩空气使涂料微粒化呈雾状,然后随空气喷射到被涂物体上。这种方法生产效率高,漆膜易于平整光滑,对涂料的适应性强。缺点是涂料飞散,损失较多,而且一道喷涂得到的漆膜较薄。



③ 静电喷涂。借助于高压电场的作用,使喷枪喷出的涂料雾状微粒带电,并且雾化得更细,通过静电引力沉积在带相反电荷的物体表面。静电喷涂所获得的膜均匀完整,附着力好,涂料利用率可达80%,而一般空气喷涂则只有30%。所使用的主要设备为静电喷涂机。

④ 电泳涂装。将被涂物浸渍于电泳槽内作为一个电极,电泳漆为电解质,通以直流电。通电后在被涂物表面形成一层带有胶粘性的漆膜,烘干后即可获得光亮坚固的电泳漆膜。电泳涂装分为阳极电泳和阴极电泳两种。阳极电泳是以被涂物作为阳极,使用阳极性涂料;阴极电泳,是以被涂物作为阴极,使用阴极性涂料,现在最广泛使用的是阳极电泳。电泳涂装必须使用专用的电泳涂料。

电泳涂装可以自动化作业。由于这种涂装的泳透力(指对被涂物内表面的涂覆能力)大,对被涂物内部、端头等也能涂装,相应地提高了防蚀性;漆膜厚度均匀,附着力强;节省大量有机溶剂,涂装损失少;无火灾危险。但电泳涂装的被涂物被限定为有导电性的,因而不能涂装第二道;对不同金属组合的被涂物,不能得到均匀的漆膜;改变颜色困难。

⑤ 粉末涂装。这是使用粉末涂料进行涂装的工艺方法。粉末涂料是热塑性树脂或热固性树脂(均为固体粉末)与颜料、填料、固化剂、增塑剂及其他添加剂一起研磨成的粉末混合物,采用熔融法在金属表面形成连续漆膜。用作热塑性粉末涂料的树脂有聚氯乙烯、聚烯烃(如聚乙烯)、聚酰胺(如尼龙)、氟树脂等。用作热固性粉末涂料的树脂有环氧、丙烯酸、聚酯树脂等。现在的粉末涂料多为热固性的,使用的最多的是环氧粉末涂料,漆膜的硬度、附着性、耐化学性等都非常好。

粉末涂料是无溶剂类的涂料,无大气污染问题;涂装合理,涂料使用率高,可一次性达到所需要的漆膜厚度,适宜于涂装自动化。但粉末涂料调色和换色困难。粉末涂装方法主要有流化床法和静电喷涂法,都必须使用专用的涂装设备。

### (5) 涂料的选用

合理选用涂料是保证涂料能较长期使用的重要因素。

① 根据环境正确选用涂料。选用涂料必须考虑被保护设备或零部件的工作环境与涂料的适用范围的一致性。这里主要是指环境介质的腐蚀性、环境温度和光照条件等。并应在适合的前提下,尽量选用价廉的涂料。

② 根据被保护表面的性质选用涂料。要考虑涂料对被保护表面是否具有足够的黏合能力,是否会发生不利于黏合的化学反应等。例如,酸固化的涂料不能涂覆在易被酸腐蚀的钢铁表面;红丹漆只适用于钢铁表面,不能使用于轻金属防锈,因铅和铝、镁之间的电位差大,会加速它们的腐蚀。当钢铁表面难以进行喷砂或酸洗表面处理时,一般应该选用防锈底漆。

③ 根据涂料的性能合理地配套选用涂料。为了获得良好的防腐蚀效果,实际应用涂料涂覆层时,一般均采用“多层异类”的涂覆原则,即选用几种不同性能的涂料配套使用,施行多层涂覆。多层异类涂层可以充分发挥各种涂料的优点,相互取长补短,从而获得理想的防护效果。对金属结构的涂装一般由底漆和面漆构成。因此,涂料的配套使用,是指底漆与基体金属的配套使用、底漆与面漆的配套使用、底漆与腻子的配套使用等。配套使用必须以漆层之间具有适当的附着力和相互间不起不良的作用为原则。

底漆是首先涂覆到基体金属上的涂层。底漆对保护金属免受腐蚀起着关键性作用,要求底漆对金属有较强的防腐蚀作用和对金属表面以及对以后的涂层都有较好的黏合性。一般是黑色金属上使用含铁红颜料的底漆;轻金属上使用具有钝化性能的锌铬黄、锆铬黄等颜料的底漆。若金属表面已经过阳极氧化、磷化和涂覆磷化底漆时,也可采用铁红底漆。磷化底漆又称洗涤底漆,由聚乙烯醇缩丁醛树脂与磷酸、铬锌黄和醇类调制而成的一种表面处理涂料。它兼有对被涂金属的表面处理作

用和底漆的作用,能代替磷化处理,有极好的附着力和高度的防蚀性能;但不能单独作为底漆,须与其他底漆配套使用。适用于钢铁、铝镁锌铜等各种金属表面。

为了提高涂料涂覆层外观的平整性,通常在两道底漆之间填刮腻子。腻子是一种颜料含量较高,呈厚浆状的涂料品种,可以填补表面凹坑、气孔等缺陷。一般是同类底漆与同类腻子配套使用。

面漆涂覆于底漆之上,其作用是建立一个耐气候和耐化学侵蚀的表面,同时给予装饰性的外观。面漆直接接触环境介质,其品种的选择与施工质量对漆膜的外观和整个涂料涂覆层的寿命影响极大。对于在湿热和海洋环境条件下使用的设备应特别注意选用防潮、防霉及防盐雾等性能良好的涂料品种。

#### ④ 用于电子产品的油漆品种及其特点。

a. 氨基醇酸漆。漆膜坚韧,附着力强,有相当的耐水、耐油、耐化学品并有良好的绝缘性能,可用于湿热气候条件下的防护层。

b. 酚醛漆。附着力强,漆膜坚硬,具有一定的耐水、耐热、耐弱酸碱性能,有良好的绝缘性能,可用作底漆和胶木板、纸胶板、布胶板、玻璃纤维板的浸渍漆。

c. 醇酸漆。附着力强,漆膜坚韧光亮,机械性能好,耐气候性较好。醇酸磁漆可用于室外的-般或恶劣气候条件下的设备防护,醇酸烘漆可用于热带气候条件。

d. 环氧漆。附着力极强,且韧性好,耐冲击性能好,对水、酸、碱及许多有机溶剂有极好的抵抗能力,表面光泽性差,一般多用于作底漆。环氧绝缘漆性能好,可作为浸渍漆。

e. 硝酸漆。漆膜坚硬耐磨,有良好机械强度,耐油、耐水性能好,一般作为良好和一般气候下的表面装饰性涂层。

f. 过氯乙烯漆。大气稳定性好并有很好的化学稳定性,防湿热、耐水、耐油性好,但附着力较差,漆膜较软,可作为一般气候条件下防护用漆。其耐热性差,只能用于 60℃ 以下的气候环境。

g. 丙烯酸漆。有良好的附着力和机械性能,有极好的耐气候性能,耐高温、耐紫外线,适用于湿热地带和作航空用漆。

h. 有机硅漆。有极高的绝缘性能和耐热性能,多用于工作在高温下的、要求绝缘的元器件做浸渍或表面涂层。

#### 4. 覆盖层的选择

从保护基体金属免腐蚀的要求来看,一般可考虑下列材料作为覆盖层。

(1) 贵金属、含铬 18% 以上的不锈钢、轧制的磁性合金材料、以及镍铜合金等,一般不需再加保护层。

(2) 碳钢、低合金钢和铸铁制造的零件,大气中容易腐蚀,应加保护层。

(3) 铜和铜合金制造的零件,根据不同的使用条件,采用光亮酸洗、钝化、电镀或涂漆保护等。用磷青铜或铍青铜制造的精密零件可以不进行表面处理。

(4) 铝和铝合金制造的零件,可以采用阳极氧化和封闭处理。

(5) 锌合金制造的零件,可以采用磷化、钝化、电镀或涂漆防护。

#### 4.3.2.3 防腐蚀结构设计

为防止腐蚀,在产品-设计阶段就应当进行合理的防腐蚀结构设计。金属结构设计是否合理对于接触腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀、均匀腐蚀的敏感性影响很大。

##### 1. 合理的结构形状

(1) 结构形状应尽可能简单和合理

形状简单的结构件容易采取防腐蚀措施,而形状复杂的结构件,其面积必然增大,死角、缝隙、接头处容易使腐蚀介质浓缩,而引起腐蚀。简单的构件还便于排除故障,有利于维修、保养和检查。

### (2) 防止残余水分的积聚

没有水分就不会发生腐蚀,残余水分和灰尘积存处,往往是腐蚀严重的部位。因此,结构设计应考虑使水分不能积存,而且还应考虑易于维修,参见图 4-1。

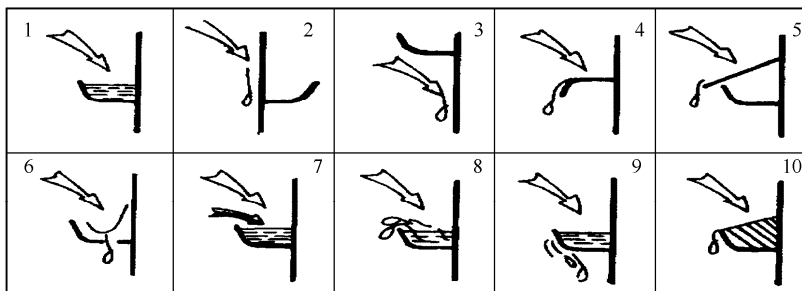


图 4-1 防止水分和灰尘积聚的结构示意图

图中 1 不好,易于积聚水分;2、3、4、5 把结构置于介质作用之外;6 采用排水孔;7 加入缓蚀剂。8 表示清扫;9 表示自动排水,10 是用填料填充。

### 2. 防止电偶腐蚀的措施

(1) 不同金属和合金应当避免直接接触,特别是在电偶序中电位相差较大的金属材料之间避免接触。不同金属和合金材料匹配连接时,应尽可能使它们的电位相接近。

(2) 在两种不同金属材料偶接处,加入第三种金属,使两种金属间电位差降低。第三种金属可以是垫片、中间部件,也可以是金属镀层的形式。

(3) 当不可避免需要异种金属接触时,一定要采取大阳极、小阴极的结构形式。

(4) 防止电偶腐蚀最普遍的方法,是在两金属之间隔入一个不吸水的有机材料绝缘物,如合成橡胶、聚四氟乙烯等,并对接触部位进行妥善的防水密封。

(5) 可以采用一种可靠的耐蚀涂料系统保护不同金属偶接部位,防止其与周围介质直接接触,以便使电偶腐蚀保持在一可接受的水平。在使用时应注意,涂料应涂在电偶对的贵金属部分。如仅在贱金属一侧涂覆涂料,则将由于保护层有小孔而形成小阳极大阴极,引起严重的点蚀,使有涂料部分的金属反而遭到破坏。

### 3. 防止其他局部腐蚀的措施

(1) 为防止缝隙腐蚀,应当尽量采用无缝隙结构设计。当设备上不可避免地造成缝隙时,必须采取适当的防护措施避免缝隙腐蚀。在设计带有垫片的连接件时,要注意垫片的大小,过大或过小都可因形成缝隙而发生缝隙腐蚀。

(2) 为防止应力腐蚀,除了注意选择在给定的环境介质不具有应力腐蚀敏感性的金属材料之外,在结构设计上应该注意尽量降低外应力、热应力、应力集中,应避免各种切口、尖角、焊接缺陷等的存在。避免使用应力、装配应力和残余应力在同一个方向上叠加。

凡有引起残余应力的区域,应进行消除应力处理或采用适当方法或使表面造成压应力。减小残余应力可采取热处理退火、过变形法、喷丸处理等。其中消除应力退火,是减少残余应力的最重要手段,特别是对焊接件尤为重要。

为把共振引起的腐蚀疲劳危险降到最小,可用隔振、吸振和减振等方式来减小承载设备或结构在腐蚀环境中的振动和颤动。不要把受腐蚀作用的设备刚性地附接在遭冲击载荷构件上,应用具有弹性的结构相连接。

(3)在有液体(如冷却水)流动的情况下,结构上应注意避免形成过度的湍流、涡流。同时,注意防止造成局部温度差、浓度差,避免造成腐蚀电池。

#### 4.3.2.4 控制环境因素

控制环境因素包括两个方面:消除工作环境中的腐蚀因素或降低其腐蚀强度;采用合理结构措施,使设备或零件处于和腐蚀介质相隔离的状态。

##### 1. 控制空气相对湿度

将环境相对湿度控制在金属腐蚀临界相对湿度以下,是防止大气腐蚀的有效方法。一般可采用下列方法:

- (1)用人工空气调节装置或除湿装置对电子设备工作环境进行温度和湿度调节。
- (2)利用设备本身的热源或附加的加热装置对设备连续加热,降低设备内部有限空间的湿度。

##### 2. 隔离环境介质

###### (1) 完全密封

将设备封闭在密封的外壳中,在其内部形成无腐蚀性的微气候环境。密封可以使设备完全不受水分、盐雾、灰尘及其他腐蚀性介质侵蚀。凡是允许和能够实现密封的地方,采用密封技术无疑是一种使设备适应恶劣环境的理想方法。

密封外壳内部的空气必须清洁干燥。为此,被密封的各个零部件必须是干燥的,不能使用可导致气氛腐蚀的非金属材料,应该尽量采用熔接技术实现密封。如果采用结构密封时,对于垫圈、转动轴、引出导线等部位都必须进行有效的密封设计;必须防止因密封件失去弹性、不良的机械损坏等因素而引起的泄漏。

为避免空气中的氧气对非金属材料老化的影响,可将干燥清洁的空气置换成氮气,氮气充入前需先经过干燥处理,以保证充氮防锈的效果。

为了降低密封内部的相对湿度,可放入干燥剂吸收水分。干燥剂一般使用硅胶。使用干燥剂应当用量充分,分布合理,以保证有一个均匀的低湿度值。

完全密封的结构不利于散热,并且由于维修困难,要求各元器件和零部件具有更高的可靠性和较长的使用寿命。这种防蚀方法比较适用于小型设备和严酷的环境条件。在一般情况下,往往只对那些对于腐蚀介质敏感的部分元器件和零部件加以密封,以求得较好的经济效益。

密封结构按使用环境分为气密结构和水密结构。由于气体的黏性系数比液体小,因此气体比液体更容易泄漏。所以水密设计可以气密设计为基础,只要考虑其特殊性(如水压引起的压缩变形和外壳材料在水中的抗蚀性等)予以补偿即可。

###### (2) 采用封闭的保护技术

即把元器件或零部件嵌入封闭的材料中。通常采用的封闭材料有塑料、树脂、橡胶、陶瓷、玻璃等。对这些材料的选择应注意其电气性能、机械性能、工艺性及防蚀效果。

##### 3. 腐蚀介质处理

当腐蚀介质的数量和波及范围有限时,可改变其成分或化学组分使其侵蚀性降低来达到防蚀的目的。

###### (1) 减小介质的腐蚀活性

例如,除去水中的氧或提高值以减小其对金属的腐蚀性;在车厢或设备的通气孔安装填入干燥剂的通风装置或其他形式的防潮过滤器,使空气排除水分后再进入车厢或设备内部。

### (2) 添加缓蚀剂

缓蚀剂是一些少量加入腐蚀介质中就能显著减缓或阻止金属腐蚀的物质,按作用机理分为阳极型缓蚀剂、阴极型缓蚀剂和混合型缓蚀剂。阳极型缓蚀剂能够抑制腐蚀电池的阳极反应,增大阳极极化,从而使腐蚀电流下降;阴极缓蚀剂能抑制阴极反应,增大阴极极化,使腐蚀电流下降;混合型缓蚀剂对阴、阳极过程都起抑制作用。

可按各种缓蚀剂的不同物理性质应用于不同场合。水溶性缓蚀剂可溶于水溶液中,通常作为酸、盐水溶液及冷却水的缓蚀剂,也用作工序间防锈水、防锈润滑切削液中。油溶性缓蚀剂可溶于矿物油中,作为防锈油(脂)的主要添加剂。气相缓蚀剂是在常温下能挥发成气体的缓蚀剂,若是固体,必须能升华;若是液体,必须具有足够大的蒸气压。这类缓蚀剂必须在有限空间内使用,如放置在密封包装容器内。

缓蚀剂防护金属的优点在于用量少、见效快、成本较低、使用方便。但它只适用于腐蚀介质的体积量有限的情况下,对于敞开体系则不适用。保护效果与金属材料的种类、性质和腐蚀介质的性质、温度、流动情况等有密切关系。

### 4.3.2.5 电化学保护

电化学保护是通过电化学方法控制金属腐蚀电位,以获得防蚀效果。电化学保护分为阴极保护和阳极保护。

#### 1. 阴极防蚀

将被保护金属进行外加阴极极化以减小和防止金属腐蚀的方法称为阴极保护。将处于腐蚀区的金属进行阴极极化,使其电位向负方移至稳定区,则金属可由腐蚀状态进入热力学稳定状态,使金属腐蚀停止而得到保护。

#### (1) 阴极保护的基本参数

在阴极保护中,判断金属是否达到完全保护,通常采用最小保护电位和最小保护电流这两个基本参数。最小保护电位,是指使金属得到完全保护时金属应具有的腐蚀电位值,其数值与金属的种类、介质条件有关。虽可进行估算,但大多是通过实验确定的。使金属得到完全保护时所需的电流密度称为最小保护电流密度。其数值与金属种类、表面状态(有无保护膜、漆膜完整程度、生物附着情况等)、介质条件等因素有关。在保护过程中,主要检查阴极保护电位范围是否合格,而保护电流密度只要能保证实现这一电位范围就可以。

#### (2) 阴极保护方法

阴极保护可以通过两种方法实现:一是牺牲阳极法;二是外加电流法。

牺牲阳极法,是在被保护的金属上连接电位更负的金属或合金,作为牺牲阳极,靠它不断溶解所产生的电流对被保护金属进行阴极极化,达到保护目的。牺牲阳极材料要有足够低的电位,能与被保护金属之间形成足够大的电位差,而且电容量大,电流效率高,不易钝化,溶解均匀,价格便宜,加工方便。牺牲阳极保护系统的设计,包括保护面积的计算,保护参数的确定,牺牲阳极的形状、大小和数量,分布和安装以及保护效果的评定等问题。

外加电流法阴极保护,是将被保护金属接到直流电源的负极,通以阴极电流,使金属极化到保护电位范围内,达到防蚀目的。外加电流法阴极保护系统主要由直流电源、辅助电极和参比电极三部分组成。直流电源可自动调节输出电流,使被保护体的电位始终控制在保护电位范围内。

辅助阳极用来把电流输送到阴极（被保护的金属）上，常用的材料有：钢、石墨、高硅铁、磁性氧化铁、铅银合金、镀铂的钛等。参比电极用来与恒电位仪配合，测量和控制保护电位。外加电流保护系统的设计主要包括选择保护参数，确定辅助电极材料、数量、尺寸和安装位置，计算供电电源的容量等。

比较两种阴极保护方法，牺牲阳极法不需要外加电源和专人管理，不会干扰邻近金属设施，分散电流能力好；但需要安装大量牺牲阳极，消耗大量金属材料。外加电流保护系统体积小、重量轻，能自动调节电流和电压，运用范围广。

阴极保护是一种经济而有效的防护措施，主要用于保护水中和地下的各种金属构件和设备。一些要求在海水、土壤中使用几十年的地下管线、电缆等都必须采用阴极保护，提高其抗蚀能力。

## 2. 阳极保护

将被保护的金属设备与外加直流电源的正极相连，在腐蚀介质中使其阳极极化到稳定的钝化区，金属设备就得到保护，这种方法称为阳极保护。阳极保护系统主要由恒电位仪（直流电源）、辅助阴极以及测量和控制保护电位的参比电极组成。

# 4.4 生物腐蚀及其防护

由于啮齿类、鸟类、爬虫、昆虫、海藻、苔藓和微生物等在材料或设备上的活动，直接或间接地引起这些材料或设备性质改变（往往是朝坏的方面改变），总称为生物引起的劣化变质，又称为生物腐蚀。其中，微生物（主要是霉菌）引起的劣化变质称为霉腐或霉变，是生物腐蚀中最主要的一类。此外，危害电子产品的生物还有昆虫、鼠类与鸟类等动物。在湿热环境中，电子材料和设备极易遭受霉菌侵蚀，因此，防霉设计是湿热环境电子设备环境防护设计的重要内容。

昆虫、鸟类和鼠类生物的破坏方式主要是咬食材料、损坏设备，或者进入设备内的带电部分，造成电气故障。在昆虫中，白蚁咬食木材及植物纤维材料，破坏力极强；聚酰胺（尼龙）、聚丙烯、增塑的聚氯乙烯等常用塑料，也会受其侵害。白蚁是最有破坏性的生物种类。老鼠和蟑螂咬坏密封包装，会使设备暴露在潮湿或其他腐蚀性环境中，咬食塑料，破坏导线或电缆的绝缘层。老鼠还啃咬某些金属，为了保持其牙齿的适当长度和硬度，或者为了打通行动路线。

防止昆虫、鼠类、鸟类等有害动物侵蚀的最好方法是机械性隔离，金属密封外壳能够起到有效的防护作用。在设备的周围设置防护屏障，在有害动物可以进入的部位设置保护性金属网罩。例如，在通风口安装每英寸 20 个网孔的防腐蚀金属网，可以防止飞行白蚁进入；用包装钢丝网将电缆环抱起来，防止动物侵蚀。

使用生物杀灭剂也是一种常用的防护方法。用灭鼠剂杀死鼠类；用溶有五氯酚的轻原油浸泡或涂刷木材和其他植物纤维材料，可以防止白蚁的侵蚀。

## 4.4.1 霉菌腐蚀基础

### 4.4.1.1 生物腐蚀的危害

霉菌在设备或材料上生长，俗称长霉，可以导致以下不良后果：

（1）材料被霉菌作为养料而被分解利用，发生霉腐，直接引起破坏。

（2）霉菌菌丝细胞含有大量水分，在电气零件或印制电路板上生长蔓延时，可引起搭桥短路。霉菌产生的代谢产物多为酸性导电物质，如饱和或不饱和羧酸、羟基酸以及醛、醇、氨和碳

氢化合物等,能够降低材料的绝缘性能而造成漏电。

(3) 油漆涂层长霉时,由于霉菌菌丝侵入而使漆膜胀裂剥落,失去保护作用。

(4) 霉菌生长在金属上时,其代谢产物会加速金属局部腐蚀。

(5) 霉菌本身的堆积或由于分泌出黏性物质形成结垢,使仪表失灵,造成机械故障或堵塞孔洞。

(6) 设备长霉后,菌体本身的色素造成污染和散发出讨厌的霉味,通常会使人对设备的可靠性失去信心。

#### 4.4.1.2 霉腐发生条件

材料发生霉腐变质,必须具备三个条件:第一,必须有微生物存在;第二,必须有供微生物生活所需的营养物质;第三,环境适宜,主要是温度、湿度。

##### 1. 有害菌种

霉菌种类繁多,有侵蚀性的霉菌主要是曲霉、青霉、木霉和芽枝霉。

霉菌生长繁殖需要营养物质,但只有分子量较小的和具有合适溶解度的物质才能被其直接利用。大分子物质则是由霉菌分泌出酶来催化分解,形成营养物质。由于不同霉菌产生不同的酶,而酶对材料有专一性,所以,生长在不同材料上的霉菌可以不一样。例如,杂色曲霉只对塑料有腐蚀性,而对多数纤维类材料无腐蚀作用;安氏曲霉经常引起光学零件长霉;而破坏漆膜的主要是黑曲霉。也有在许多材料上都能很好地生长的霉菌,如黑曲霉。

由于霉菌在自然界分布极广,土壤、水域、空气、动植物体内外均有其踪迹,因此可以说,霉腐发生的可能性随时随地都存在。

##### 2. 营养物质

微生物生长所需要的营养物质应该包含有组成细胞的各种元素。这些物质可以概括为:

(1) 碳源物质 供构成细胞物质的碳素来源的物质,包括简单的无机含碳化合物和天然有机含碳化合物。

(2) 氮源物质 提供构成细胞物质的氮素来源的物质,有蛋白质或它们的降解产物(如胨、肽、氨基酸等)和含氮无机盐。

(3) 无机盐 有硫酸盐、磷酸盐、氯化物以及含有钠、钾、镁、铁等金属元素的化合物。

(4) 水 营养物质的吸收与代谢产物的分泌,都是通过水来完成的。

天然有机物是上述物质的主要来源。此外,生产过程和人类活动某些产物也可以被微生物利用。特别应该指出的是,只要有足够的水分(湿度),其他养分极少时霉腐微生物也能生长。一个指印或污迹以及自然环境中不可避免地存在着的少量挥发性有机气体,凝结在物体表面,就足以支持霉腐微生物的生长。实际生活环境中,不受这种可为霉菌利用的物质污染的机会是很少的。即使完全没有外界养分,只要条件合适,霉菌孢子靠本身储存的养料,也能发育到一定程度。如玻璃、金属和某些惰性材料,本身并不能为微生物所利用,但在实际使用过程中有时仍然会长霉。

##### 3. 湿度、温度

微生物吸收营养物质时,只有分子量较小的和具有合适溶解度的物质才能在细胞周围形成适当的溶液,透过微生物细胞壁被其利用。大分子的分解过程则是由微生物分泌的酶来催化的,酶催化的反应都是在水介质中进行的。因此,微生物必须在具有足够高湿度的环境才能生长和发育。同时,为了保证在最有利的条件下进行酶反应,还要求合适的温度和范围。

各种微生物都有其生长繁殖的最低温度、最适温度、最高温度和致死温度。最低生长温度是

指微生物能进行繁殖的最低温度界限，低于此温度则生长完全停止。使微生物迅速生长繁殖的温度，称为最适生长温度。最高生长温度是指微生物生长繁殖的最高温度界限，温度若再进一步升高，便可杀死微生物。这种致死微生物的最低温度界限，即为致死温度。

应该指出，不利的温度、湿度对微生物发育生长不利，但不等于就会死亡，而是大多数处于休眠状态，一旦条件合适又将发育生长。

#### 4.4.1.3 材料的耐霉性

原则上讲，凡是不能为霉菌所利用作为其营养物质的材料都具有耐霉性。反之，则容易受霉菌侵蚀。金属在清洁干燥状态不受霉菌侵蚀。非金属材料中，玻璃、陶瓷、石棉等也是不利于霉菌生长的材料。天然有机材料，如天然橡胶、油脂、蛋白质、糖；动植物纤维材料，如皮革、木材、纸张、棉花、羊毛、蚕丝和天然纤维纺织品等；以动植物原料为基材的胶黏剂和涂料，都是易长霉材料。

合成高分子材料（塑料、合成橡胶、涂料、胶黏剂）抵抗霉菌侵蚀的能力受多种因素影响。这些材料均以合成树脂为基础成分，但因其化学结构不同，有不同的耐抗霉性。一般地说，聚烯烃（聚乙烯、聚丙烯等）基本不受霉菌的侵蚀；聚氯乙烯树脂、酚醛树脂、各种氟塑料、聚砜、聚苯醚、氯化聚醚等也具有抗霉能力；而尼龙、聚酯、有机玻璃则有可能受到霉菌的破坏作用。但通常使用的高分子材料一般须加入填料、增强材料、增塑剂、固化剂、抗氧剂、溶剂、颜料等助剂，以改善其使用性能和满足成型加工的要求，这将为其抗霉能力增加许多不利因素。以塑料为例，目前使用的增塑剂主要是苯二甲酸酯类、磷酸酯类、脂肪酸酯类、聚酯类、环氧酯类和含氯化合物。这些有机化合物中，有些是易长霉物质，如油酸酯、蓖麻油酸酯即属此类。含有这种增塑剂的塑料容易受霉菌侵蚀。作为填料或增强材料，如果使用了易长霉材料，也会使塑料容易受霉菌侵蚀。其他助剂也是如此。例如，酚醛塑料的基础成分为苯酚甲醛树脂或苯酚苯胺甲醛树脂，若以木粉作填料，则这种酚醛塑料吸湿性较大，耐霉性差；若以定向玻璃纤维、石英或云母粉作填料，则塑料具有良好的耐潮性和耐霉性。

#### 4.4.2 霉菌的防护

破坏微生物引起霉腐所必需的任何条件，就能阻止微生物生长，达到防霉的目的。

##### 4.4.2.1 控制环境条件

绝大部分霉菌滋生的最适当的气候条件是温度为 20~30℃；相对湿度高于 70%。如果采取措施把温度降低到 10℃ 以下，绝大部分霉菌就无法生长。例如，在生产车间、库房等采用空调以消除霉菌生长条件；用足够的紫外线辐射、日光照射防霉并消灭已生长的霉菌。此外，定期对电子设备通电增温也能有效地阻止霉菌生长。

##### 4.4.2.2 隔离霉菌与营养物质

（1）密封防霉 将设备严格密封，并加入干燥剂，使其内部空气干燥、清洁，这是防止霉菌生长的最有效措施，可达到长期防霉效果。因为霉菌只有在潮湿情况下才能通过酶的作用进行新陈代谢与繁殖生长。在干燥的环境下，如湿度低于 65% 时，霉菌就不会生长。故密封干燥不仅可以防止霉菌侵入，又可以阻止霉菌生长。此外，在密封设备中充以高浓度的臭氧可以消灭霉菌。

（2）防霉包装 为防止电子设备在流通过程中受到霉菌侵蚀，可采用防霉包装。防霉包装



通常要求对易发霉的产品或零、部件先进行有效的防霉处理,然后再包装。或是将产品采用密封容器包装,并在其内放置具有抑菌或杀菌作用的挥发性防霉剂进行包装。

(3) 表面涂覆 通过刷涂、浸渍或其他方法,在材料或零部件表面形成一层憎水并且不为霉菌利用的保护性涂层,或者是含有防霉剂的涂料层,使微生物无法接触到材料或零部件。例如,用有机硅清漆涂覆塑料制品,用添加防霉剂的环氧酯漆浸渍线圈。

#### 4.4.2.3 使用防霉材料

由于防霉剂有毒性,并易于挥发,只能在几个月或一两年内有防霉效果,所以在解决湿热地区产品长期防霉问题时,关键还在于选择具有防霉性能的材料或适当改变现有材料的成分,使之增强抗霉性能,这是防霉的根本途径。应该根据以下原则选择抗霉材料:

① 避免使用易于霉变的非金属材料。

② 以金属材料制成的零部件,除非其工作在不利霉菌生长的环境,否则应采用表面涂层加以保护。具有防霉性的油漆材料有改性有机树脂漆、聚胺脂绝缘漆、聚氨基甲酸酯漆、丙烯酸漆等。

③ 对合成高分子材料,应尽量选用合成树脂本身具有耐霉性的品种。用来制造塑料的合成树脂本身就具有较好的防霉性,只是制造塑料时,由于改性的需要添加了油类等增塑剂,这样就使制成的塑料失去或降低了抗霉菌侵蚀能力,因而适当改变现有塑料的成分是提供防霉材料的新途径。例如,以玻璃纤维、石棉、云母、石英为填料的塑料,氟橡胶、硅橡胶、氯丁橡胶,以环氧为基本成分的清漆。

④ 对难以判断的材料,应通过试验确定抗霉能力,再加选择。

综上所述,电子设备应采用以玻璃纤维、云母、等为填料的压塑材料;橡胶宜采用氟橡胶、硅橡胶等合成橡胶;黏结剂及密封胶宜采用以环氧树脂为基本成分的黏结剂;绝缘浸渍则宜用改性环氧树脂漆和以有机硅为基本成分的油漆。

#### 4.4.2.4 防霉处理

当设备的结构形式不能保证避免霉菌的侵蚀时,必须对材料进行防霉处理。所谓防霉处理,是指使用杀菌剂并通过适当的工艺方法对材料加以处理,使其具有抗霉能力。

##### 1. 杀菌剂

杀菌剂是指具有杀死或抑制微生物生长毒性的化学物质。多数杀菌剂可在生产过程中与其他原材料混合在一起使用,或对产品进行防霉的后处理。通常不需改变或很少需要增加原来的生产程序,使用方便。

常用的杀菌剂主要是有机杀菌剂,包括有机铜化合物、有机锌化合物和有机酸等。杀菌剂之所以能够抑制微生物的生长或导致其死亡,是因为影响了微生物的代谢过程。如有的杀菌剂能产生抗代谢作用或与代谢产物发生作用,使正常的代谢物变为无效的代谢物;有机化合物中的醇能使细胞变性。用防霉剂处理零件和整机,其防霉效果显著。

作为一种实用杀菌剂,必须具备的条件是:有足够的杀菌力,毒性低,对人无毒性或实际不表现其毒性;性能稳定,对产品及设备无不良影响;价格低廉,来源方便。

##### 2. 防霉处理方法

对材料的防霉处理,可根据不同种类和使用情况,在制造过程中或使用前进行;而对零部件和整机,是在加工后或装配后再进行防霉处理。常用的防霉处理方法有以下三种:

(1) 混合法 把防霉剂与材料的原料混合在一起,制成具有防毒能力的材料。例如,对于热塑性塑料,可将防霉剂先与增塑剂混合,然后与树脂及其他填料混合均匀,按普通塑化工艺进行塑化和使用;对于涂料,可将防霉剂混入其中制成防霉漆。

(2) 喷涂法 把防霉剂和清漆混合,喷涂于整机、零件和材料表面。

(3) 浸渍法 将防霉剂溶于溶剂制成稀溶液,对材料进行浸渍处理。此法可用于棉纱、纸张等。

各种防霉剂都具有不同程度的毒性或难闻气味,使用时应注意劳动保护。

## 4.5 材料老化及其防护

### 4.5.1 材料老化基础

#### 4.5.1.1 老化的概念

塑料、橡胶、涂料等高分子材料都是以高聚物为基本组分,而且大多数是合成高聚物。它们的差别只在于机械性能和使用状态的不同。塑料是在室温下处于玻璃态的高聚物,而作为橡胶使用的高聚物必须在包括室温在内的很宽的温度范围内处于高弹态。有不少在塑料和橡胶中应用的高聚物都可以用作涂料或者作为涂料的改性材料。

老化是由于高分子材料的化学组成、分子结构和物理状态等内因和经受光、热、电、机械应力、氧气、臭氧、化学介质等外因作用而引起的腐蚀现象。一般把高分子材料在化学介质或化学介质与其他因素共同作用下腐蚀的老化称为化学老化;而把在大气环境中,因受太阳紫外线、空气中的氧和环境温度、湿度的作用导致的性能劣化称为大气老化或环境老化。高分子材料抵抗化学介质的能力通常称为耐腐蚀性;抵抗室外气候条件的能力称为耐候性。

老化是一种不可逆的变化,或者说是不可逆的化学反应。但是,有些高分子材料当受到外界某种因素的影响时也会出现类似老化的现象。例如,有些绝缘材料受潮后绝缘性能下降,但干燥后,又恢复原有的绝缘性能;某些工程塑料在温度不同的条件下,其机械性能呈可逆性的起伏变化等。这类可逆性的变化,实质上是一种物理过程,没有触及高分子化学结构的变化,因此不属于老化。

在电子设备的环境防护设计中,主要以防止大气老化为主。

#### 4.5.1.2 老化的特征

高分子材料的老化现象虽然很多,但归纳起来主要的变化表现在以下四个方面:

(1) 外观的变化 例如变色、龟裂、银纹、发粘、变硬、变软、变脆、变形、失光、粉化、起泡、剥落等。

(2) 物理性能的变化 例如密度、溶体指数、导热系数、透光率、透气率、分子量、羰基含量等变化。

(3) 力学性能变化 例如拉伸强度、伸长率、冲击强度、弯曲强度、剪切强度、硬度、弹性、附着力、耐磨强度等改变。

(4) 电性能变化 例如绝缘电阻、介电常数、介质损耗、击穿电压等改变。

一种高分子材料在它的老化过程中,一般都不会也不可能同时具有或同时出现上述所有的变

化和现象,往往只是其中一些性能指标发生变化。在对不同的高分子材料进行老化的评定时,通常根据不同的使用要求,从实用角度出发,有所侧重地选择一些评价指标,如对结构材料选强度和尺寸稳定性;对于绝缘材料可选表面电阻;对热绝缘材料选导热系数。作为防腐、防锈的涂料,主要考核其耐腐蚀的性能要求,有良好的附着力、耐水和其他腐蚀介质,因此,起泡、裂纹、生锈、脱落是主要的评价指标。

#### 4.5.1.3 老化的内因

引起高分子材料老化的内因有:

(1) 高聚物的化学结构,即链节的组成和结构,大分子链节的排列方式,端基的性质,支链的长短和多少等。

(2) 高聚物的物理结构,即高分子的聚集状态(如无定形态、结晶态、取向态)以及高聚物与其他材料(增塑剂、填充剂等)的混溶状态。

(3) 成型加工条件的影响和外来杂质的影响。

以聚四氟乙烯和聚乙烯塑料为例,在聚四氟乙烯的链节中,只有碳、氟两种原子。在所有元素中,氟的电负性最强,与碳原子结合特别牢固,其他原子取而代之很困难。同时,氟原子的尺寸大小适中,排列紧密,将长长的碳链包裹在内,使碳链受不到一般活泼分子的侵袭。而聚乙烯的链节也只有碳和氢两种原子,但碳氢键不如碳氟键结合牢固。此外,氢原子的尺寸很小,它在聚乙烯分子中不像氟原子那样能把碳链包围住。因此,聚乙烯的耐老化性能比聚四氟乙烯差。

聚丙烯分子中含有的碳原子数很多,因而聚丙烯树脂是各种塑料中最不稳定的。不加稳定剂的纯树脂不能储存,加工困难,因而非加防老剂不可。

#### 4.5.1.4 老化的外因

影响高分子材料老化的外因是指外界的环境因素,有物理因素、化学因素和生物因素等。主要是:太阳光、氧、臭氧、热、水分以及工业有害气体、微生物等大气环境因素。此外,机械应力的作用、成型加工条件的影响也属外因。

(1) 太阳光

太阳光是影响高分子材料老化的最主要的外因之一。通过宇宙空间和地球表面大气层而到达地面的太阳光能量约占太阳辐射总能量的43%,这就是影响高分子材料老化的太阳光能量。

(2) 氧和臭氧

氧能对许多物质发生氧化反应。高分子材料的老化,实际上也是在热的参与下或者在光的引发下(抑或是热、光同时作用下)进行的氧化反应。臭氧对高聚物的作用同氧一样,主要是起氧化反应。

(3) 热和气温变化

太阳光的红外线为物质所吸收,转变为热能。热是促进高分子材料老化的又一重要因素,因为热促进了氧化反应的进行。

大气环境中的气温并不高,许多高分子材料试样的表面温度接近于地面的温度(附着于金属表面的油漆涂层的表面温度要高一些)。因此,仅以大气气温单一因素来说,它对高分子材料老化的影响是不大的。但是,由于同时有光、氧等因素参与和配合,热对高分子材料老化起着加速作用,气温越高,加速作用越大。大气气温冷热交替的温差作用对某些高分子材料的老化产生一定的影响。例如,涂料漆膜因温度的交替变化,热胀冷缩往复不断地进行,引起漆膜内应力的变

化，破坏了它与基材的附着力，从而使漆膜脱落。

#### （4）水和大气湿度

大气环境中的降水、潮湿（水汽）等因素都会影响高分子材料的老化。雨水，特别是凝露形成的水膜，能够渗入材料内部，使高分子材料体系内的某些水溶性物质、增塑剂被水溶解、抽提或吸收，从而逐步改变材料的组成和成分比例，加速材料的老化。在分子结构中含有可水解基团（如酰胺基、酯基、缩醛基等）的聚合物，在雨水或潮湿的长期作用下，往往会发生水解反应。如果这类基团存在于大分子的主链上，分子链断裂，分子量迅速下降。大气中相对湿度的高低对高分子材料老化的速度亦有一定影响。一般来说，相对湿度大，有利于材料的加速老化。

除了上述几种气候因素外，微生物（霉菌和细菌）、昆虫、海洋生物也能引起或加速高分子材料老化。

#### （5）其他因素

高聚物在成型加工过程中受到外界热及压力的作用，使其内部发生了不同变化，因而不同的成型加工条件所得到的制品具有不同的耐老化性能。如用挤压法生产的塑料制品，由于在加工过程中受到比较强的热应力的作用，使高分子发生降解或消耗一部分稳定剂，导致制品的耐老化性能下降。而用模压法制取塑料制品时，对耐老化性能影响就较小。

涂料的施工工艺、成膜条件、涂装方法等，对于漆膜的物理机械性能和耐老化性能也有很大影响。例如，烘漆的成膜是依靠热交联反应而固化的。烘烤温度过高或时间过长，容易造成漆膜变脆、变色等；烘烤温度偏低或时间太短，则漆膜硬度不够、附着力差。金属表面处理得不干净，有氧化膜、铁锈或其他沾污物存在，势必降低漆膜附着力，造成漆膜早期剥落。而提高物体表面的粗糙度有助于提高漆膜在其表面上的附着能力。实践证明，用喷砂处理钢铁表面，涂漆后的附着力要比手工打磨工艺结合牢固。

### 4.5.2 高分子材料的防老化

高分子材料的防老化可以从两方面采取措施。一方面，可用添加防老剂的方法来抑制光、热、氧等外因对材料的作用；也可用物理防护方法使材料避免受到外因的作用。另一方面，可用改进聚合和成型加工工艺或改性的方法，提高高分子材料本身对外因的稳定性。

#### 4.5.2.1 添加防老剂

防老剂是一类能够防护和抑制光、热、氧、臭氧、重金属离子等外因对高分子材料产生破坏作用的物质。添加防老剂可以改善材料的加工性能，延长材料的储存和使用寿命，方法简便而效果显著，是当前高分子材料防老化的主要途径。依据防老剂的作用机理和功能，可以分为以下几种：

- （1）抗氧剂 能够抑制氧化反应和臭氧老化反应。
- （2）紫外线稳定剂 防止和抑制光氧化反应的发生和发展。
- （3）热稳定剂 防止材料在加工（高温下）和使用过程中受热而发生降解或交联。
- （4）防霉剂 防止材料发生霉腐。

添加防老剂的方法，对于塑料通常是在树脂捏合、造粒时加入，也可在聚合或聚合反应的后处理时加入。对橡胶，可在合成橡胶的聚合反应的后处理过程中加入，也可以在生胶加工成半成品或制品的过程中加入。

在电子设备结构设计中，应该根据具体使用环境选用那些对光、热、臭氧等因素具有较高稳定性和本身具有耐霉性的高分子材料，同时，应该选用添加了防老剂的材料品种。

#### 4.5.2.2 物理防护

物理防护主要是指在高分子材料表面涂覆上一层防护层,防止大气老化。具体方法有:

(1) 涂漆 许多塑料都可以采用涂漆的方法来提高耐候性。选用塑料使用的涂料时,应注意各种涂料对于各种性能不同的塑料适应性不同。除应考虑涂料对塑料的粘着性,还必须考虑塑料的应变、耐热性、增塑剂的迁移性等。目前用作橡胶防护涂层的涂料有:改性天然橡胶涂料、硅橡胶涂料等。应当注意,由于橡胶是高弹性材料,所以不宜使用缺乏弹性、硬度高、脆性大的涂料。

(2) 镀金属 在塑料制品表面镀上一层金属保护膜,能对塑料的老化起到良好的防护效果,还可以使其表面具有金属特性,扩大了应用范围。目前,镀金属的塑料品种以ABS和聚丙烯占多数。此外,聚砜、聚苯醚等工程塑料也可以用镀金属的方法提高耐候性。

(3) 涂布防老剂溶液 将高分子材料制品浸入含有防老剂的溶液中,或将这些溶液涂布在制品上,使能抑制外因作用的防老剂都集中在表面形成保护膜,从而可起到显著的防护效果。在橡胶表面涂防老剂溶液也是一种有效的防老化措施。石蜡这类物质是一种良好的橡胶防老剂,它在橡胶表面形成的一层膜,能够隔离和阻止氧和臭氧对橡胶的侵袭和破坏,还能减弱光对橡胶的破坏作用。

#### 4.5.2.3 改进成型加工和后处理工艺

改进成型加工和后处理工艺也是提高高分子材料制品的质量和延长其使用寿命的方法之一。塑料制品成型前的原料干燥、增强材料(如玻璃纤维)的表面处理、冷却速度、成型后的热处理等,橡胶的塑炼、混炼、成型、硫化等工序,正确选择处理方法和合理确定工艺参数对防老化都具有重要作用。

成型后的塑料制品中,或多或少都存在残余的内应力。如果内应力相当大,则会使塑料制品在使用过程中发生翘曲、龟裂和性能严重变坏。成型后进行退火热处理,可以消除残余内应力,预防过早产生开裂(特别是有金属嵌件的制品)。

## 第5章 电子设备隔振缓冲技术

振动的一般含义，是指任何物理量交替增减的变化。本章主要是以机械系统的振动作为研究对象，讨论电子设备的振动问题。仪器设备及其支持装置（包括减振装置）构成的隔振系统，是一种多自由度系统。隔振系统设计的任务是，设计（或选择）适当的减振装置，在设备上进行合理的配置，使设备实际承受的力或产生的位移、速度、加速度等低于许可值。

### 5.1 电子设备的机械环境

#### 5.1.1 概述

电子设备在使用、运输和存放过程中，不可避免地会受到机械振动、冲击和其他形式的机械力作用，如果结构设计不当，就会导致电子设备损坏或无法工作。

为了防止或减少振动与冲击对电子设备的影响，必须全面了解设备工作时周围的环境，正确分析设备受振动和冲击的情况，正确设计减振缓冲系统，以保证电子设备的性能指标。

##### 5.1.1.1 机械环境的类型

电子设备在运输和使用过程中会受到的机械力干扰形式，包括振动、冲击、离心力和机构运动所产生的摩擦力等。在设备所处的场所，这些对设备构成影响和干扰的机械力通常统称为设备的机械环境。根据机械环境对设备的作用性质，可将其分为四种类型。

##### 1. 周期性振动

周期性振动是指机械力的周期性运动对设备产生的振动干扰，并引起设备作周期性往复运动。产生这一干扰的主要原因是：运载工具的发动机振动，例如汽车、舰船、飞机、导弹等发动机工作时产生的剧烈振动；设备内部的电动机、风机、泵产生的振动，等等。

表征周期性振动的主要参数：振动幅度和振动频率。

##### 2. 非周期性干扰——碰撞和冲击

非周期性干扰是指机械力作非周期性扰动对设备的作用。其特点是作用时间短暂，但加速度很大。根据对设备作用的频繁程度和强度大小，非周期性扰动力又可以分为碰撞和冲击两种情形。

（1）碰撞 设备或元件在运输和使用过程中经常遇到的一种冲击力，例如，车辆在坑洼不平的道路上行驶、飞机降落、船舶抛锚等。这种冲击作用的特点是次数较多、具有重复性，波形一般是正弦波。

（2）冲击 设备或元件在运输和使用过程中遇到的非经常性的、非重复性的冲击力。例如，撞车或紧急刹车、舰船触礁、炸弹爆炸、设备跌落等。其特点是次数少、不经常遇到，但加速度大。例如，舰船在一般环境条件下受到的加速度并不大，但在炸弹或鱼雷爆炸时，它受到的冲击

加速度可达  $1\,000\sim 5\,000g$  ( $g$  为重力加速度)。

表征碰撞和冲击的参数: 波形、峰值加速度、碰撞或冲击的持续时间、碰撞次数等。

### 3. 离心加速度

离心加速度是指运载工具作非直线运动时设备受到的加速度。例如, 飞机在急剧转弯时, 除受到振动、冲击等机械力的作用外, 还受到离心加速度作用。离心力所造成的破坏是严重的。例如, 具有电接触点之类的电器产品, 如继电器、开关等, 当离心力作用方向恰好与电接触点的开、合方向一致时, 若离心力大于电接触点间的接触压力, 触点将自动脱开或闭合, 将造成系统误动作、信号中断或电气线路断路等故障。

### 4. 随机振动

随机振动是指机械力的无规则运动对设备产生的振动干扰。随机振动在数学分析上不能用确切的函数来表示, 只能用概率和统计的方法来描述其规律。随机振动主要是外力的随机性引起的, 例如, 路面的凹凸不平使汽车产生随机振动; 海浪使船舶产生随机振动; 火箭点火时由于燃烧不均匀引起部件的随机振动, 等等。

#### 5.1.1.2 环境条件界限

恶劣的机械环境将直接影响到电子设备的可靠性。为评价电子设备的机械环境承受能力, 通常是根据设备的使用场合, 将作用于设备或系统的机械环境条件划分成不同的严酷程度, 对设备进行环境试验, 以检查设备或系统在机械环境中可能出现的失灵、失效以及可靠性下降。

设备在实际工况中所遭遇的最严酷的环境条件称为环境条件界限。在此环境条件中, 设备及其元器件所能承受的最低振动 (或冲击) 强度称为强度下限。

国家有关标准和规范规定了不同使用场合的环境条件界限, 称为环境条件的严酷度等级; 对各种元器件则规定了相应的强度下限。在进行电子设备结构设计时, 应根据设备的使用场合, 了解环境条件界限及其对设备造成的影响。

#### 5.1.1.3 机械作用的影响

在电子设备所处的机械环境中, 各种机械力和干扰形式都有可能对设备的可靠性造成危害, 其中危害最大的是振动和冲击。电子设备受到振动与冲击时, 它们造成的破坏有两种: 一种是设备在某一外激振动频率作用下产生共振, 振幅越来越大, 最后因振动加速度超过设备的极限加速度而破坏; 或者由于产生的冲击力超过设备的强度极限而使设备遭到破坏。另一种是疲劳损坏, 虽然振动和冲击加速度未超过极限值, 但在长时间的作用下, 设备及其元器件、零件部因疲劳过度而导致损坏。具体的危害有下面 10 种。

(1) 没有附加紧固措施的接插件 (如集成电路模块、印制板、带接插头的连接电缆等) 会从插槽中跳出来, 造成信号开路, 并碰撞其他元件或电路而造成短路或损坏。

(2) 阴极射线管电极变形、短路、折断; 或者由于各电极作过多的相对运动而产生噪声信号, 不能正常工作。

(3) 振动引起弹性零件变形, 使具有触点的元件 (电位器、波段开关、插头插座等) 产生接触不良或完全开路。

(4) 指示灯忽亮忽暗, 仪表指针不断抖动, 使观察人员读数不准, 视力疲劳。

(5) 当零件固有频率和激振频率相同时, 会产生共振现象。例如, 可变电容器极片共振时, 使电容量发生周期性变化; 振动使调谐电感的铁芯移动, 引起电感量变化, 造成回路失谐, 工作

状态破坏。

(6) 电路中的安装导线变形及移位,使其相对位置改变,引起电路的分布参数变化,从而使电感、电容的耦合发生变化。

(7) 设备的机械结构(机壳、支撑架、支撑板等)变形,脆性材料(如玻璃、陶瓷、胶木、聚苯乙烯)断裂。

(8) 防潮和密封措施受到破坏。

(9) 锡焊或熔焊处断开。

(10) 螺钉、螺母松开甚至脱落,并撞击其他零部件,造成短路和破坏。

电子设备中各种元器件数量多,许多元器件承受机械环境的能力较弱,因机械作用力引起损坏所致的故障率很高。在机械环境中,振动将导致元件或材料疲劳损坏;而对冲击来说,由于在很短时间内冲击能量转化为很强的冲击力,超过设备所能承受的强度极限,从而导致元器件或结构件破坏。

设备破坏的原因,除了零部件的设计、制造和装配质量不合格等以外,主要是在设计整机或零部件时,忽视了环境条件的严酷度对设备造成的影响,没有充分考虑设备承受环境条件界限的能力,或是振动和冲击的隔离系统设计不正确所致。

## 5.1.2 单自由度系统的振动

### 5.1.2.1 单自由度无阻尼振动

#### (1) 单自由度系统

机械振动是物体受交变力作用,在某一位置附近作往复运动。如电动机放在一简单支架上,当电动机旋转时,由于转子的不平衡,质量的惯性力引起电动机产生上下和左右方向的往复运动,若限制其左右运动时,就构成最简单的振动(单自由系统的正弦振动),如图 5-1 所示。

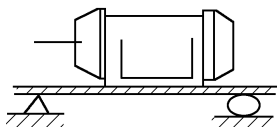


图 5-1 振动模型

在任意瞬间仅需要一个坐标就可确定其位置的系统称为单自由度振动系统。单自由度振动系统是研究多自由度系统和弹性体振动的基础。在工程中不仅有很多单自由度振动系统的例子,而且有些复杂的系统有时也可以简化为单自由度系统。

#### (2) 无阻尼自由振动

物体只能在一个方向上产生振动位移,位移  $x$  与时间  $t$  的关系,可用最典型而简单的正弦振动曲线来描述,如图 5-2 所示。

位移  $x$  对时间求导,则可得振动时某一瞬时的速度  $v$ ,再对时间进行求导,可得振动时某一瞬间的加速度  $a$ 。工程上通常用重力加速度  $g$  的倍数来衡量加速度的大小。如某汽车上的电子设备,承受的振动频率为  $100\text{Hz}$ ,最大振幅为  $0.5\text{mm}$ ,则该设备因振动所受到的最大加速度为  $20g$ ,为重力加速度的 20 倍。

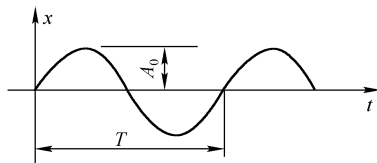


图 5-2 运动曲线

电子设备和其隔离系统组成的弹性系统作自由振动时,其振动频率只与系统本身的质量及弹簧的刚度有关,这个频率称为弹性系统的固有频率。

在无阻尼自由振动系统中,设某电子设备的质量为  $m$ ,系统的刚性系数为  $K$ (由弹性元件的



材料与几何特性而定)。\$K\$ 值愈大, 则说明弹簧愈硬, 即要施于较大的力, 才能得到一定的形变。系统的固有频率可写成

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (5-1)$$

由式(5-1)可知, 当改变系统的刚性或系统的质量时, 系统的固有频率随之而改变。

### 5.1.2.2 单自由度有阻尼自由振动

上面讨论的自由振动因略去了运动阻力, 系统在振动过程中机械能守恒, 因此始终保持等幅振动。实际上系统在运动中不可避免地存在阻力, 随着时间的延长, 振动将逐渐衰减直至停止。运动中的阻力有各种形式, 如含有润滑剂的两个物面的摩擦力、两物体间的干摩擦力、气体或液体等介质的阻力、电磁阻力以及材料的粘弹性产生的内部阻力等。这些阻力在振动中统称为阻尼。

精确地描述各种形式的阻尼是困难的, 一般地, 我们可确定阻力与运动方向相反。对于含有润滑剂的两个接触面来说, 它们之间存在一层油膜, 阻力则与润滑剂油膜的黏性和物体的相对速度成正比, 即

$$F = -cv \quad (5-2)$$

这是研究振动问题时, 可以得出精确解的最常见的一种阻尼描述。式中 \$c\$ 称为黏性阻尼系数, 表示系统在单位速度下所承受的运动阻力。负号表示阻尼力的方向与速度方向相反。含有这种阻尼的振动系统称为黏性阻尼系统。由于阻尼力与速度成线性关系, 故黏性阻尼又称为线性阻尼。线性阻尼使问题的求解大为简化, 在分析振动问题时, 对于弱非线性的阻尼一般都可利用黏性阻尼作为基本模型, 将它们等效成线性阻尼进行近似计算。

阻尼力愈大, 则振动衰减得愈快。如图 5-3 所示, 有阻尼自由振动角频率为

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (5-3)$$

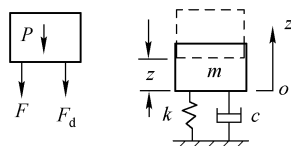


图 5-3 有阻尼自由振动

阻尼系数 \$c\$ 愈大, 阻尼愈强。我们把 \$\omega\_1=0\$ 时的阻尼系数称为临界阻尼系数, 用 \$c\_0\$ 表示。一切弹性系统的阻尼系数, 都介于 0 和 \$c\_0\$ 之间。将 \$c\$ 与 \$c\_0\$ 之比定义为阻尼比 \$D\$。阻尼比表示了弹性系统的阻尼情况, 即阻尼对振动的影响。阻尼比 \$D\$ 愈大, 表示阻尼作用愈强。减振器的阻尼比可以从手册中查得。

### 5.1.2.3 单自由度强迫振动

由于阻尼的存在, 自由振动会很快地消失。在实际中所见到的持续振动, 是靠外界的激振力对弹性系统做功, 即输入能量以弥补阻尼所消耗的能量。这种在激振力的作用下使系统产生的振动称为有阻尼的强迫振动, 如图 5-4 所示。

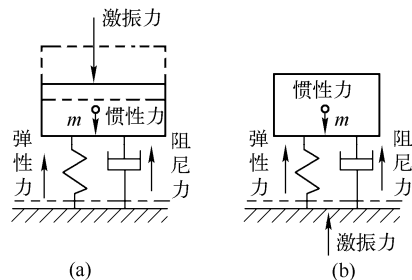


图 5-4 有阻尼的强迫振动

引起强迫振动的激振源运动规律有不同的形式, 例如, 激振源作周期性的简谐运动、周期性非简谐运动及随机运动等。系统对不同运动规律的激振源的响应存在很大差别, 在分析和研究工程中的强迫振动问题时, 必须确定激振源是按什么规律运动, 才能正确求得系统的响应。事实上, 工程中许多强迫振动的激振源通常都可简化、归纳

为简谐运动。

强迫振动可以在很多情况下产生,在电子设备所处的机械环境中,引起设备或系统强迫振动的激振一般可分为以下两种。

(1) 力激振 激振力直接作用在系统的质量上。例如,雷达天线受到风力载荷引起天线系统的振动;车辆、飞行器、舰船等发动机的振动所引起的运载器载体振动;安装在设备中的旋转机械(如电动机)上不平衡质量的惯性力引起的振动,如图 5-5(a)所示。

(2) 位移激振 激振力没有直接作用在振动系统上,而是由于系统支撑体的运动,通过弹簧和阻尼间接作用在系统上,引起系统作强迫振动。例如,车辆驶过不平的路面引起车厢振动;采用减振器安装在车辆、飞行器、舰船等运载器中的电子设备,因运载器的运动而引起的振动,如图 5-5(b)、图 5-5(c)所示。

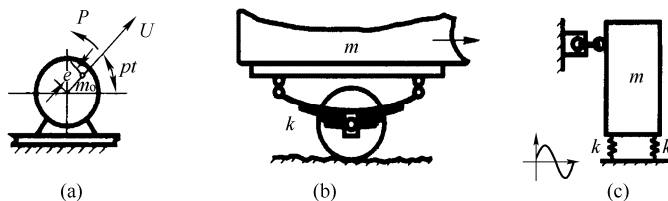


图 5-5 常见的强迫振动

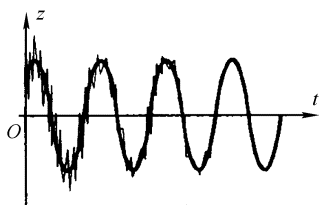


图 5-6 系统开始作强迫振动的运动图

图 5-6 所示为系统对初始激励和力激励的响应叠加曲线。由于阻尼的存在,系统对初始激励的响应是一种衰减振动,经过一段时间之后很快消失,因此称为瞬态响应。此后,系统作稳定的等幅振动,称为稳态响应,稳态响应的频率和激振频率相同。

对于某一确定的弹性系统,其阻尼比  $D$  也是确定不变的。当外激振动参数已知时,系统强迫振动的振幅大小与激振力频率  $f_j$  及系统固有频率  $f_0$  有关。

### 5.1.3 多自由度系统的振动

#### 5.1.3.1 两自由度系统的自由振动

前面讨论了单自由度的振动问题,但遇到下述情况时则要分析两个自由度的振动问题。

##### (1) 插箱中的元器件

用于设备中的插箱结构通常具有较强的耐振性,但插箱中的一些零、部件,例如容易共振的可变电容器,质重不大的压电晶体,含有玻璃、陶瓷材料的无线电元件等,对隔振的要求却比较高。如果对电子设备整机或者插箱进行隔振后尚不能满足这些零、部件的要求,就需要对它们再作隔振设计。通常,设备整机或插箱一般选用刚度较大的减振器,而耐振性差的零、部件则用刚度小的减振器进行局部隔振。

##### (2) 双层隔振

当激振频率很低时,单层隔振系统的隔振系数不容易设计得很小。采用增大频率比的方法来获得一些精密仪表所期望的隔振效果是很困难的,在这种情况下,可增设一个中间质量使系统成为双层隔振。

### (3) 刚度小的支撑结构

刚度较小的支撑结构有可能出现较大的挠度，支撑结构的运动会受到被支撑物体的运动干扰。此时，应将支撑结构和被隔振设备化作两个自由度系统进行分析。

当设备受到的干扰力不仅有铅直方向作用，而且还有水平方向的作用时，系统就不能再按单自由度振动理论进行分析。如果设备刚性较好，可将其简化为刚体，按单质体多自由度振动系统进行分析。

真实的电子设备并非质点或刚体，而是由许多元器件所组成。这些元器件通常安装在插箱或插入构件单元内，然后通过导轨、接插件及各种构件与机架连接成一个整机系统。若将它按单自由度系统处理，则所求得的响应与实际出入较大。合理的分析方法是把它化作多自由度系统，两自由度振动是多自由度振动的一个特例，也是常见的方法，具有一定的代表性。

#### 5.1.3.2 多自由度系统的振动

##### 1. 多自由度系统的自由振动

电子设备总是由许多元器件组成的，这些元器件都有一定的质量和弹性，所以将系统化作多自由度系统处理将更接近实际情况。

图 5-7 是一个电子设备的机箱，它通过前面板和机架连接，机箱中装有变压器等元件。在机架垂直振动时，机箱产生类似于悬臂梁的弯曲振动，其力学模型为三自由度的振动系统(见图 5-8)。

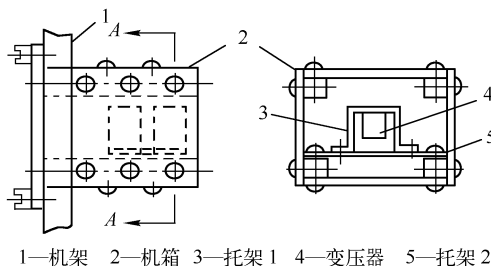


图 5-7 固定在机架上的机箱

当机箱中有两个用同样方式固定的变压器时，其力学模型为五自由度的振动系统(见图 5-9)。

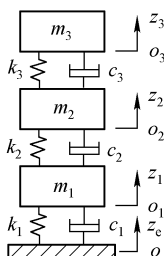


图 5-8 三自由度的振动系统

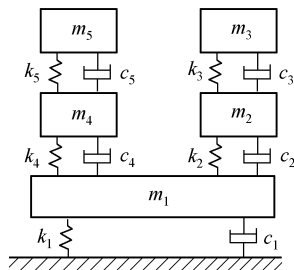


图 5-9 五自由度的振动系统

图 5-10 中，设备由三个分箱通过侧面的连接板连成一个整体。若把每个分箱看成一个集中单元，连接板与箱壳的弹性变形成作弹性元件，则该设备同样可当作三自由度系统处理。当分箱内有较大的质量支撑在弹性物体上时，设备将化为更复杂的多自由度系统。通过合理简化所建立的力学模型，其自由度愈多，就愈接近实际情况，但计算量也愈大。要想建立与复杂的电子设备响应特性完全一致的力学模型几乎是不可能的。

## 2. 单质体多自由度系统的振动

在振动环境中的电子设备通常都要采用减振器进行振动隔离。分析此类问题时，一般是将设备视为刚体，而设备与减振器则组成具有最多为六个自由度的振动系统，这种系统称为单质体多自由度系统。

图 5-11 就是将减振器安装在设备底部，在忽略阻尼时的一种单质体多自由度系统。这个系统除了可沿三个坐标轴方向平移振动之外，还可以绕三个坐标轴作回转振动。系统的每一种平动或转动都有其固有频率，因此一共有六个固有频率。

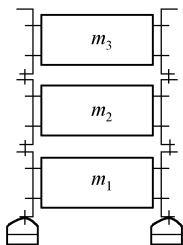


图 5-10 三个分箱组成的电子设备

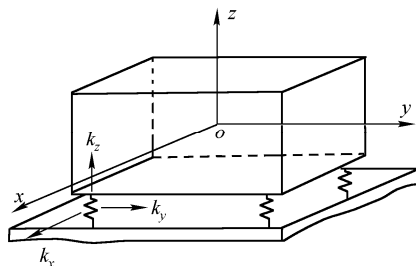


图 5-11 六个自由度的振动系统

这些自由度之间可能作非耦合运动，也可能是耦合运动。如果一种振动方式对另一种方式不产生影响，就是非耦合振动；反之则是耦合振动。采用减振器支承时，振动的耦合情况取决于设备重心位置、减振器的安装方式、各减振器的弹簧刚度等。

(1) 非耦合自由度 在图 5-12 (a) 中，如果设备受力矩作用绕重心旋转一角度，则支撑弹簧出现一侧伸长，另一侧缩短。当外力消失时，设备将以回转方式振动；若沿设备重心方向施力，弹簧则出现等量伸缩。移去外力时，设备将以平移方式垂直振动。由于两侧弹簧的支点位置对称于设备的重心，且刚度相等，故回转与平动这两种振动互不影响，所以是非耦合系统。在图 5-12 (b) 中，虽然弹簧的支点位置与重心不对称，但弹簧的刚度按比例配置，使转动与平动两种振动能互相独立，因此也是非耦合系统。

(2) 耦合自由度 图 5-13 (a) 中，弹簧的支点位置与重心对称，但两侧弹簧的刚度不同；图 5-13 (b) 中，两侧弹簧刚度虽相等，但支点位置与重心不对称。在这两种情况下，假如沿设备重心方向移动一个微小的距离后放开，不仅有垂直振动，而且因弹簧产生的力矩不等，还将出现绕重心回转的振动。同理，当设备绕重心作回转振动时，必将引起垂直方向的振动，也就是说，两种振动方式都是耦合的。

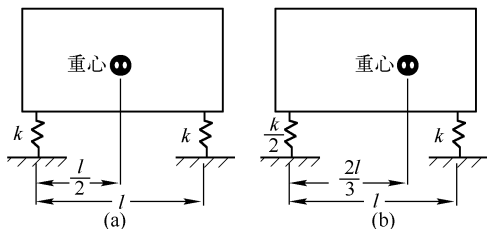


图 5-12 非耦合自由度

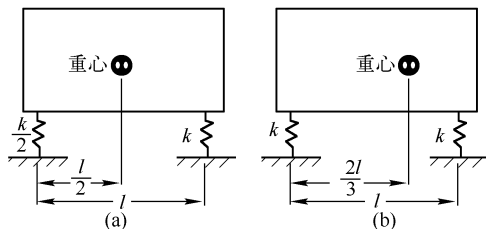


图 5-13 耦合自由度

## 5.2 振动和冲击的防护

根据电子装备抗恶劣环境设计的要求，电子装备必须在全寿命期内经受振动、冲击（含三维

强冲击)、碰撞、核爆、风激励等力学环境的考验。

除了对电子设备中组件、插箱进行应力筛选、对整机进行结构加固以提高其抗力学环境能力外,采用隔振、缓冲系统来缓和或避免力学环境对电子设备的有害影响,可以达到降低电子设备加固成本、提高其可靠性和使用寿命的目的。

## 5.2.1 防护原理和措施

### 5.2.1.1 隔振缓冲的原理

#### 1. 隔振原理

装载电子设备的飞行器、地面车辆和舰船,通常都会因它们的机动性而使设备受到强烈的振动干扰。电子机柜因散热需要,常在机柜内部装有风机、冷却泵等动力机械,它们产生的振动不仅干扰设备自身的正常工作,还会将振动传递到支撑基础,并对基础和周围设备产生振动干扰。当然,避免振动的最好方法是消除振源,但通常是不现实的。比较可行的方法是采取措施将研究对象(如设备或基础)与振源进行隔离,使振源传递给研究对象的振动得以减弱甚至消除。这种将研究对象与振源进行隔离的方法称为隔振。

在工程中,通常是针对不同的振源将隔振分为主动隔振和被动隔振。当机器或设备本身是振源时,将其与支撑基础隔离开,以减少它对基础的影响,称为主动隔振。如果振源来自基础运动,将设备与基础隔离,以减少对设备的影响,称为被动隔振。

在初步设计中,通常假定基础作简谐振动,而被保护的仪器设备则假定为刚体,其力学模型如图 5-14 所示的单自由度振动系统。

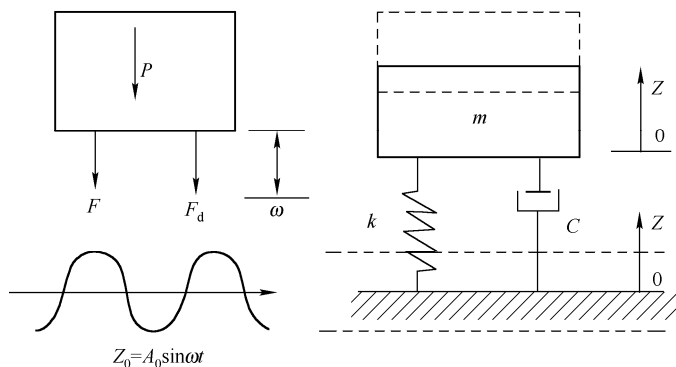


图 5-14 隔振示意图

设基础的激振规律为:

$$Z_0 = A_0 \sin \omega t \quad (5-4)$$

式中  $A_0$  为激振力引起的基础振动的振幅 (m);  $\omega$  为激振力角频率 (rad/s);  $t$  为时间 (s)。

为了进一步说明弹性系统的隔振性能,可引入隔振系数  $\eta$ , 它为被隔离设备的振幅  $A$  与基础激励振幅  $A_0$  之比。由结构动力学得到:

$$\eta = \frac{A}{A_0} = \sqrt{\frac{1 + 4\xi^2\gamma^2}{(1 - \gamma^2)^2 + 4\xi^2\beta^2}} \quad (5-5)$$

式中  $\eta$  为隔振系数, 亦称传递率;  $\xi$  为阻尼比;  $\gamma$  为频率比, 外激振动的频率  $f$  和系统固有频率

$f_0$ 之比。

从 $\eta$ 的物理意义可知,只有当 $\eta < 1$ 时,才可能隔振。 $\eta$ 越小,隔振效果越好。为说明隔振效果,引出隔振效率 $E$ ,定义为:

$$E = (1 - \eta)100\% \quad (5-6)$$

由隔振系数公式(5-5)所确定的函数曲线如图5-15示,图中不同的曲线对应于不同的 $\xi$ 值。

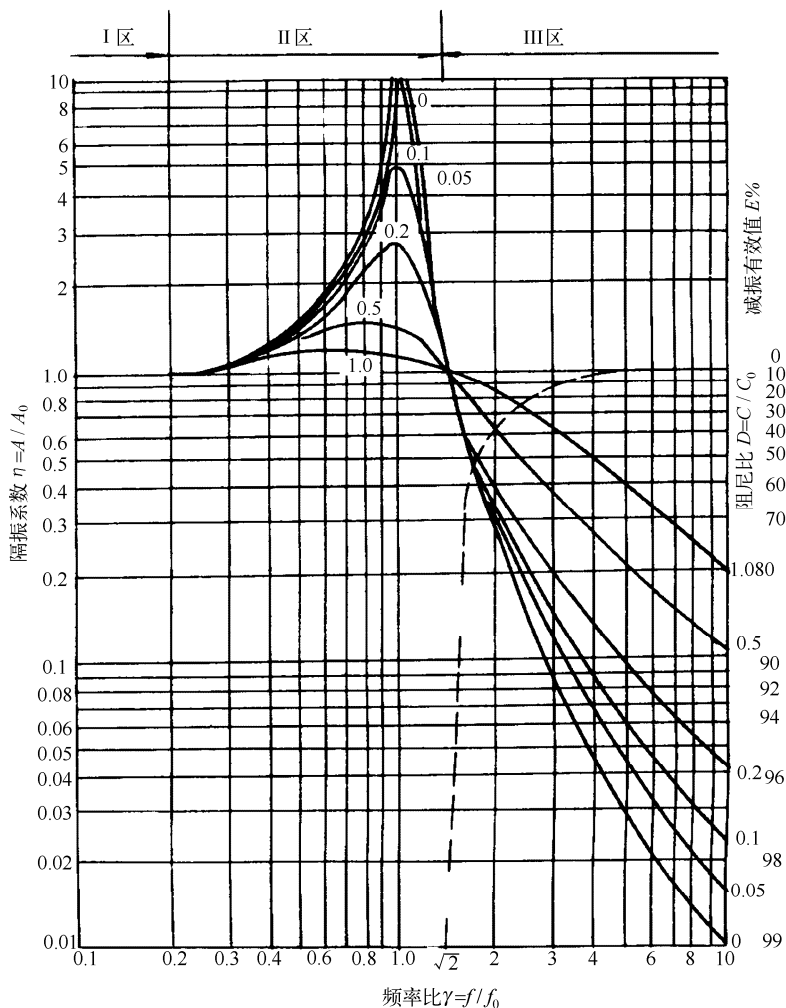


图 5-15 隔振系数曲线

由曲线图 5-15 可以得出以下结论:

- (1) 在 I 区 当激振频率比减振系统的固有频率小很多时, 没有必要装减振器。
- (2) 在 II 区 当激振频率接近系统的固有频率时, 特别是小阻尼时, 设备的振幅很大, 这种现象称为共振。显然在共振时减振系统起了助振作用, 在设计时应尽量避免。
- (3) 在 III 区 不论阻尼比  $D$  的大小, 隔振系数均小于 1, 即强迫振动的振幅  $A$  小于基座振动(外激振动)的振幅, 减振器只有处在这一区域才能起减振作用。

为了使电子设备在外激振动下不受或少受影响, 就要对电子设备采取减振措施。在电子设备

上安装减振器,使设备构成弹性系统,从要求系统减低或隔离振动的需要出发,使 $f > \sqrt{2}f_0$ ,就能得到良好的减振效果。在外激频率已知的情况下,正确地设计或选择减振器的静刚度 $K$ ,就能改变系统的固有频率,以满足 $f > \sqrt{2}f_0$ 的条件,达到减振或隔振的目的。

在图 5-15 中,似乎 $D$ 愈小,其振幅下降愈显著。这一结论仅适用于激振频率不变(振源是简谐振动)的情况;实际上电子设备所处的机械环境,其激振频率通常不是一个单一频率,而是在一个较宽范围内变化的频带。还有各种各样的冲击。这种冲击会引起设备的自由振动和很大的位移,阻尼太小,自由振动就不能很快衰减。另外,为减小通过共振区时设备的共振振幅,系统也必须有较大的阻尼。如汽车的振动频率是在 $2 \sim 100\text{Hz}$ 之间。外界激振频率完全有可能通过共振区,这时共振很大;但实际上由于起动和停车的转速变化时间很短,且采用 $D$ 值较大的减振器,因而虽然 $f$ 通过共振区,也不会出现很大的振幅。

## 2. 缓冲

冲击是一种常见的急剧运动,如汽车的起动与停止、物体的跌落等都能产生较大的冲击。缓冲与减振相似,也分主动缓冲和被动缓冲两类,电子设备大都属于被动缓冲。

由能量定理 $P = Ft$ 可知:当外来冲击能量 $P$ 一定时,其冲击力作用的时间 $t$ 愈长,则设备所受的冲击力 $F$ 愈小,冲击加速度愈小( $F = ma$ )。因此若加大冲击力作用的接触时间,就可以减轻设备所受冲击力作用的影响。从能量观点来看,缓冲设计实质上是把瞬时的、强烈的冲击能量,以位能的形式最大限度地储存在冲击减振器中,使减振器产生较大的形变。冲击结束后,冲击减振器能缓慢地将能量释放出来,达到保护电子设备的目的。在一般情况下,减振器越软,冲击力作用的接触时间越长,减振器的形变越大,设备受到的冲击就越少,从而达到防护目的。

### 5.2.1.2 隔振缓冲的措施

#### 1. 消除振源

减弱或消除振动和冲击的干扰源。例如振动子、通风机、运载器中的发动机等都应进行单独隔振,对旋转部件应进行动平衡试验,消除因制造、装配或材料缺陷造成的偏心引起的离心惯性力。

#### 2. 结构刚性化

当激振频率较低时,应增强结构的刚性,提高设备及元器件的固有频率与激振频率的比值,使隔振系数接近于 1,以达到设备和元件的固有频率远离共振区。

例如,设备中的导线应尽可能编扎在一起,并用线夹分段固定在刚体结构上。又知,安装在印制电路板上的电阻、电容、晶体管、集成电路模块多尽量采用无引线元器件焊接,必须采用的带引线器件也应最大限度地缩短引线,以提高其刚度。

在各种边界条件中,悬臂式结构的刚性最差(如图 5-16 所示),在振动激励下很容易引起结构损坏。这是结构设计应避免的结构形式。

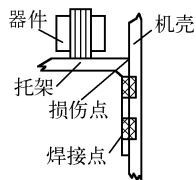


图 5-16 托架上安装变压器的损伤点

提高元器件、组部件和结构本身的抗振动、冲击能力。

采取各种措施增加元器件、组部件和结构件的强度和刚度,以及合理地配置和安装元器件、组部件,如图 5-17 所示。

另外,还可采用甲基硅橡胶灌封整个印制板插件,使印制板及其上的元器件成为一个整体,能很大程度提高印制装配板的抗振动、冲击的能力,但维修困难,必要时才能采用。

#### 3. 隔离

在振动源与敏感元件之间引入隔离措施。虽然振动和冲击是两种不同性质的机械因素,但在

结构设计时,往往只采用一种装置来隔离振动和冲击的影响,这种既能减振又能缓冲的机械结构称为减振器。

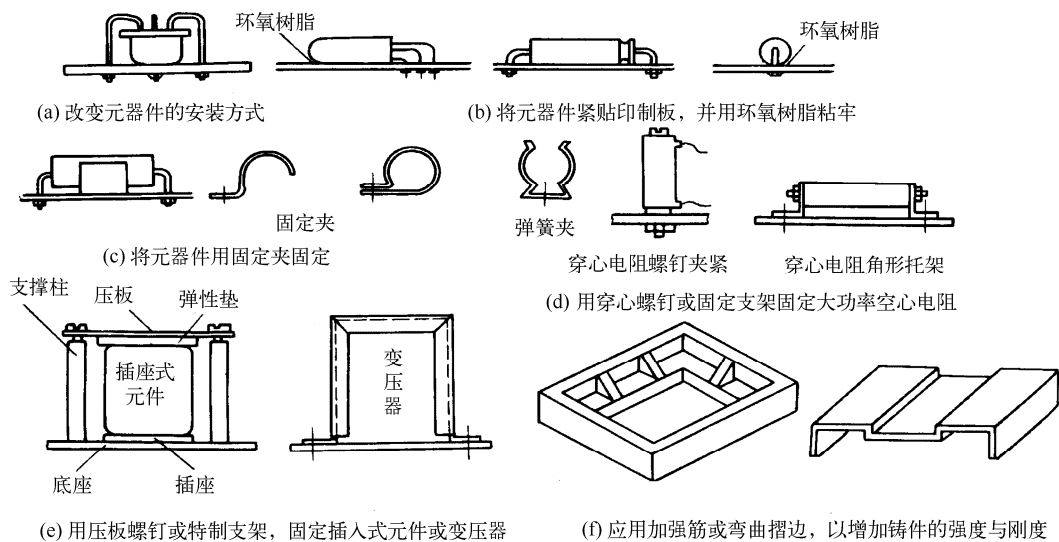


图 5-17 元件的固定方法

当激振频率较高时,用提高结构刚度的方法避开共振会使设备笨重、成本提高。这时可在设备和基础之间安装减振器,以减少振动和冲击对设备的危害。对于陶瓷、玻璃等元件(或其他脆性元件)与金属零件的连接处,或者某些结构或设备内部因元件排到密度高,空间有限而无法安装减振器时,可采用具有软弹性的胶状物充填在需要隔离的部位,以起到减振的作用。

#### 4. 阻尼减振技术

利用减振器对设备进行振动冲击隔离时,减振器的作用在于减弱机械环境对设备的干扰。在很多情况下,由于电子设备并不是理想的刚体,因此,当被减弱的干扰振幅(位移或加速度等)传递到设备上时,也有可能引起结构或设备中的某些零部件发生共振。尽管改变质量和刚度或者进行二次隔振可以避开共振,但是,当一些特殊的微小型零件或连接部件难以实施二次隔振,而质量、刚度又不能改变过大时,尤其是在干扰频率较宽的情况下,这些措施可能收效甚微甚至难以奏效。这样,人们自然会想到能否用阻尼来进行减振,例如,将阻尼材料涂覆或粘贴在振动体上;采用粘弹性材料作为芯层镶嵌在振动体(基层)与覆盖层(约束层)之间等,使物体或结构发生振动时通过这些阻尼形式消耗大量的振动能,达到降低振幅的目的。

阻尼减振技术反映了现代振动控制的新水平,它已成功地应用于许多领域。阻尼减振能有效地降低共振频率,对于那些既要抗振而又不能通过增加重量提高刚度的结构特别适宜。例如,宇航中的电子设备、潜艇的船壳、地铁车轮、锯片、风镐钻头、高层建筑等。由于采用了阻尼减振技术,振动和噪声都有明显的下降。

##### (1) 黏弹性阻尼材料

由单体分子共聚或缩聚而成的高分子材料是一种较为理想的阻尼材料。当受到外力时,这些高分子呈现出既有固体弹性,又有流体黏性的中间状态。当聚合物受到拉伸外力时,其分子链一方面被拉伸,另一方面在分子与分子之间还会产生链段的滑移。外力消失后,被拉伸的分子要恢复原位,这就是黏弹性体具有的弹性。但是,链段间的滑移并不能迅速、完全地恢复到原位,从而造成聚合物产生永久变形,这就是黏弹性体具有的黏性。链段间滑移所作的功不能完全返回的



部分,就以热能形式消耗在周围环境中。利用这一特性将机械振动或声振动转变成热能,从而起到减振和降噪的作用。

黏弹性材料的动态特性可用弹性模量和损耗因子来描述。损耗因子是一个振动周期中阻尼能与最大弹性变形成之比,它反映了材料耗散振动能量的能力。显然,阻尼能越大,损耗因子就越大。

### (2) 阻尼减振的基本原理

材料在运动中因自身存在内摩擦,与结构的结合面之间的摩擦一样都会引起阻尼,这种阻尼称为结构阻尼。增加材料自身的结构阻尼可降低材料或结构的响应位移和加速度,这就是阻尼减振的基本原理。

### (3) 结构阻尼与复合阻尼结构

#### ① 结构阻尼有下面两种。

a. 系统阻尼。它是指接合面之间的摩擦阻尼,由高压界面产生相对运动而引起,其损耗因子一般在  $0.01 \sim 0.05$  之间。

b. 材料的内摩擦阻尼。它是由材料的内耗引起的。铅的损耗因子约在  $10^{-3}$  量级;铝、镁的损耗因子约在  $10^{-4}$  量级;铸铁的损耗因子稍大一点,约为  $10^{-2}$  量级。

上述材料的阻尼都比较小,难以获得明显的减振效果,因此不得不采用外加阻尼。高分子聚合物或阻尼橡胶,损耗因子可达  $2 \sim 3$ 。在工程应用上,将聚合物阻尼材料与金属薄板组成复合结构,强度由金属板提供,阻尼由高分子聚合物实现。这种复合结构的综合损耗因子可达  $0.1 \sim 0.5$ 。

#### ② 阻尼复合结构可分为两种形式,即自由阻尼结构和约束阻尼结构。

a. 自由阻尼结构。将黏弹阻尼材料粘贴或喷涂在需要减振的结构物上(可以是单面的,也可以是双面的,如图 5-18 所示),即构成所谓自由阻尼结构。一层不够可以再贴一层。它通过黏弹材料的延伸及剪切吸收振动能量。

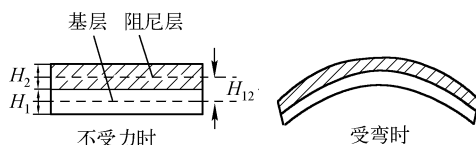


图 5-18 自由阻尼结构

自由层阻尼结构受温度变化的影响大,低频时效果差,结构损耗因子也不高;但计算简便,工艺简单,成本低廉。

b. 约束阻尼结构。在振动体(基层)上贴阻尼材料(称为阻尼层),然后在它上面再覆盖一层金属材料(称为约束层)而构成的阻尼结构,称为约束阻尼结构。也可以做成多层。基层和约束层统称为结构层。结构层提供强度,阻尼层吸收振动能量。典型的三层结构如图 5-19 所示。约束层、阻尼层和基层的厚度比可以小到  $1:1:10$ 。

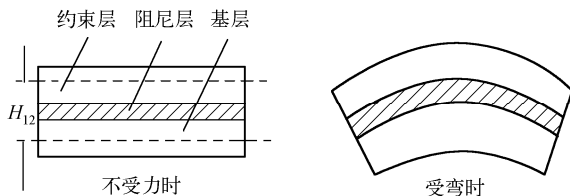


图 5-19 约束阻尼结构图

因为结构振动时,阻尼层主要发生剪切变形,如果它太软,剪切应变虽大,应力却不大,因

而能量损耗少；反之，如果阻尼层太硬，因为剪切应变不大，能量损耗也少。所以，对阻尼层的刚度应取其最佳值，即取最佳剪切参数，以使阻尼层消耗的能量最大。

约束阻尼板结构设计要点是确定结构的振型，找出应变较大的各个部位，贴上约束阻尼材料。在结构质量和刚度许可的条件下，应尽量采用对称夹心结构。通过设计，选定所用的阻尼材料，确定阻尼层厚度、约束层厚度和结构的损耗因子。

#### 5. 其他措施

(1) 调谐元件应有固定制动装置，使调谐元件在振动和冲击时不会自行移动。

(2) 继电器是对动态机械环境比较敏感的元件，为了保证可靠性，可在使用一个继电器的地方同时使用两个功能相同而固有频率不同的继电器。这样，如果其中一个在某一频率下失效，另一个可照常工作。

(3) 在安装元件之前，最好了解它的耐振性能。例如显示器沿阴极方向能经受的加速度比垂直于阴极方向能经受的加速度大数倍，而像继电器和可变电容器之类的元器件等也同样具有方向性，因此，在结构设计时应考虑其最佳方向问题。

(4) 可快速拆卸的元件、部件（如接插件、熔断器等），应该采用专门的固定装置紧固，防止在振动或冲击下自行脱出。

(5) 采用新型高分子轻质材料（如泡沫硅橡胶等）封装元件，能对强冲击、振动下易损部件进行防护。对应力有严格要求的电子器件，例如某些高频部件、计算机的高速度内存存储器芯片等就要考虑这种措施。

(6) 在电视机、计算机等电子设备的运输过程中，可采用聚乙烯气垫薄膜等新型材料进行包装维护。

(7) 两端受到约束的导线或电缆，就像是一根松的琴弦，其固有频率很低，容易落在干扰频谱之中。如果所用的导线比较细、长、软，则在振动产生的惯性的作用下，轻者可使它产生永久变形，重者就可能在导线的两端引起脱焊或拉断。因此，通常都尽量将几根导线编扎在一起并用线夹做分段固定，以提高其固有频率，提高抗冲击抗振动能力。但单线连接有时是不可避免的，这时使用多股导线比单股硬导线好，跳线不能过紧也不能过松。若过紧，在振动时由于没有缓冲而易造成脱焊或拉断；若过松，在振动时易引起导线摆动造成短路。

## 5.2.2 减振器设计

### 5.2.2.1 对减振器的基本要求

系统的振动特性受三个参数的影响，即质量、刚度和阻尼。对于电子设备的振动和冲击隔离来说，隔振系统的质量一般是指电子设备的质量，而刚度和阻尼则由设备的支撑装置提供。用于减弱振动和冲击传递的支撑装置称为减振器。采用减振器进行隔离是减弱振动和冲击对设备造成干扰的一种主要措施。

通常，如果干扰频率的范围比较窄，或者使隔振系统发生共振的干扰频率在共振区的历经时间很短，那么，减振器的设计和使用都很方便。当干扰频率的范围比较宽，尤其是当干扰频率在共振区的历经时间较长时，减振器就呈现明显的双重性。因为发生共振时，将引起系统产生过大的相对位移并在设备上作用很大的加速度，此时减振器的作用恰好相反，其结果是导致设备或系统发生故障甚至损坏。在这种情况下，增加减振器中的阻尼可减小系统共振时的响应振幅。但是，减振器中的阻尼也具有双重性。一方面，总希望获取很大的阻尼来达到尽可能降低共振幅度的效

果；另一方面，不适当地增加阻尼却导致系统在隔振区的隔振效率下降。因此，减振器中的阻尼量值应根据设备的环境条件、系统所允许的最大相对位移及设备所允许的最大加速度综合衡量。

(1) 隔振系统采用的减振器，应具有变刚度特性，并应同时具有隔振、缓冲两种功能。通过减振器传递给电子设备的振动、冲击量值，必须小于设备的允许值。

(2) 由于设备重心不可能与减振器支撑平面的几何形心完全重合，为了避免耦合振动造成的有害影响，减振器应在相同外形和安装尺寸前提下，形成具有固有频率相近、承载量不同的模块化系列产品，从而将隔振系统的刚度中心逼近设备质心（甚至相重合）。加载后，各支撑点减振器的实际固有频率与理论固有频率的相对偏差应小于 10%。

(3) 减振器应具有变阻尼特性，在共振区内有大阻尼以抑制共振峰值，在隔振区内阻尼迅速减小，以达到较好的隔振效果和无谐振传递率特性。

(4) 为了避免前一个碰撞脉冲引起隔振缓冲系统的残余响应，与后一个碰撞脉冲同相位叠加造成的有害影响，减振器应具有足够阻尼力以耗散冲击能量，保证在后一个碰撞脉冲到来之前设备的残余响应为零。

(5) 减振器应具有低蠕变、设备安装基面调水平的功能，以及弹性元件失效后设备仍处于安全支撑状态的保护装置。

(6) 减振器自身的抗振动、冲击性能，抗腐蚀，耐高低温及稳定性和使用寿命等，应优于被保护电子设备。

### 5.2.2.2 减振器的种类和特点

减振器所用的弹簧种类繁多，按提供弹性恢复力的材料划分，一般有橡胶弹簧、金属弹簧、空气弹簧、泡沫材料、软木、毛毯等。比较而言，橡胶和金属弹簧减振器的结构紧凑，工艺成熟，生产成本低，适用性强，可靠性比较高。因此，这两种减振器被广泛应用于电子设备的振动、冲击隔离。

#### 1. 金属弹簧减振器

以金属作为弹性材料的减振器称为金属弹簧减振器，其特点如下：

(1) 材料的性能稳定，对环境条件反应不敏感，可在油污、高低温等恶劣环境下工作，不易老化。

(2) 动刚度和静刚度基本相同，而且刚度的取值范围很大，故适用于静态位移要求较大的减振器；弹簧不但能做得很柔软，亦能做得非常硬。当工作应力低于屈服应力时，弹簧不会产生蠕变。但是，应力超过屈服应力时，也会使弹簧产生永久变形，因此，使用时应保证动态应力不超过弹性极限。

(3) 材料自身几乎无阻尼，容易传送高频振动，或者由于自激振动而传送中频振动。在经过共振区时，设备会产生过大的振幅，有时需要另加阻尼器或在金属减振器中加入橡胶垫层、金属丝网等，以克服这一缺点。

(4) 金属弹簧的设计计算比橡胶弹簧容易，其弹簧刚度可根据要求确定，不仅设计资料比较成熟，且其刚度可以制造得相当准确。

#### 2. 橡胶减振器

橡胶减振器是以橡胶作为减振器的弹性材料，其特点如下：

(1) 取型和制造比较方便。根据需要可随意选择三个相互垂直方向上的刚度，改变橡胶的内部构造，可大幅度改变弹簧刚度。

(2) 橡胶自身具有较大的阻尼，对高频振动的能量吸收有显著效果。使用橡胶减振器的动力机器在通过共振区时，不致产生过大的振幅，故不需另加阻尼器。

(3) 阻尼比  $D$  随橡胶硬度的增大而增加。长时间处于共振状态时，橡胶会发生蠕变而使阻尼失

效, 故橡胶减振器适合于系统偶尔发生共振的情况, 也适合于静位移小而瞬时位移可能很大的冲击。

(4) 在动载荷下的弹性模量比静载荷大, 两者比值一般在 1~2 之间。随着硬度的增加以及频率的升高, 动态弹性模量也会变大。当橡胶受力时, 变形总是滞后于作用力, 即作用力改变时橡胶的变形并不同时改变。所以橡胶的动刚度比静刚度大, 设计或选用减振器时必须考虑这一因素。

当系统受到冲击时, 橡胶减振器的冲击刚度比静刚度、动刚度都大, 这对缓冲特别有利。

(5) 橡胶的性质受环境条件影响大。

### 3. 库仑摩擦阻尼减振器

用机械摩擦产生阻尼, 它包括金属丝网减振器。此类减振器适合恶劣的工作环境, 可以获得较低的共振传递率和固有频率。主要缺点是结构较复杂, 体积和重量较大, 技术难度较大。

#### 5.2.2.3 减振器设计、选用的原则

(1) 在电子设备的隔振设计中, 应尽量选用已颁布的标准产品, 对于一些有特殊要求而又无标准产品可用的场合, 则可根据需要自行设计减振器。设计减振器要考虑的主要因素是:

- ① 根据对隔振系统固有频率和减振器刚度的要求, 决定减振器的形状和几何尺寸。
- ② 根据对系统通过共振区的振幅要求, 决定阻尼系数或阻尼比。
- ③ 根据隔振系统所处的环境和使用期限, 选取弹性元件的材料以及阻尼材料。

(2) 设计和选用减振器的一般原则 结构紧凑、材料适宜、形状合理、尺寸尽量小、隔振效率高。具体设计和选用时, 还应注意以下因素。

① 载荷特点。例如, 电子设备的支撑大多采用几何对称布置, 而设备的重心却往往偏离几何对称轴。设计和选用减振器时, 不仅要考虑总重量, 还应考虑各支撑部位的重力大小, 以确定每个减振器的实际承载量, 使设备安装减振器后, 其安装平面与基础平行。

② 减振器的总刚度应满足隔振系数的要求。此外, 无论设备的支撑布置是否与几何中心对称, 均应使各支撑部位的减振器刚度对称于系统的惯性主轴。

③ 减振器的总阻尼既要考虑系统通过共振区时对振幅的要求, 也要考虑隔振区隔振效率, 尤其是频率较高时对振动衰减的要求。

#### 5.2.2.4 金属弹簧减振器的设计

一般来说, 金属弹簧减振器中的弹簧可分为承载型和非承载型。承载型弹簧不仅具有系统运动的刚度特性, 而且还起着支撑和平衡设备静态重力的作用; 非承载型弹簧则仅在系统运动时提供弹性恢复力。例如, 一些重心较高的电子设备除了在底部用减振器支撑之外, 一般都要在设备的

背面或侧面等非承载方向安装减振器, 以防止设备在运动中倾覆, 或者减弱系统的耦合振动, 在本章中, 除非另有说明, 凡涉及减振器中的弹簧, 均指承载型弹簧。

金属弹簧减振器用弹簧钢板或钢丝绕制而成, 常用的有圆柱形弹簧和圆锥形弹簧两种。这种减振器的特点见 5.2.2.2 节。

金属弹簧减振器一般未标准化, 需要根据具体条件来设计。图 5-20 是用圆锥形螺旋弹簧作弹性元件的减振器, 当减振器加不同负载时, 弹簧刚度对振动系统质量的比值大致保持不变, 即达到减振目的。这种减振器具有较低的固有频率,

减振器内有一个橡胶气鼓, 当减振器振动时, 气流通过气孔产生摩擦而获得阻尼, 低温、低气

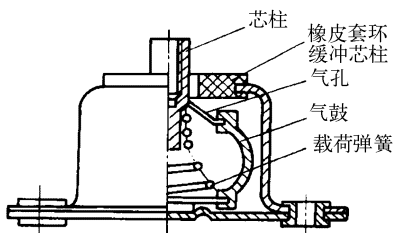


图 5-20 JZN 型阻尼减振器

压时,减振器的阻尼是冻结橡胶的弯曲振动得到的。减振器顶部的橡胶用于缓冲。这种减振器的缺点是在水平方向不能满意地工作,可附加稳定器来克服这一缺点。

无谐振峰隔振缓冲器是根据隔振、缓冲技术所要求的变刚度、变阻尼特性设计的新型抗强冲击型减振器,它是采用刚度拟合技术和干摩擦阻尼技术实现低固有频率,无共振放大,并可兼顾缓冲和抗强冲击的典型实例之一。在结构上,它采用几组具有独立弹性-阻尼特性组件,从而可以灵活地组装成具有不同承载量、不同动态特性的减振器或阻尼器。由于阻尼可以调节,可以很方便地控制振动传递率。

### 5.2.2.5 橡胶减振器设计和制造

橡胶减振器是以橡胶作为减振器的弹性元件,以金属作为支撑骨架,故又称橡胶-金属减振器。这种减振器的特点见 5.2.2.2 节。

#### 1. 橡胶减振器的设计

目前在电子工业中,应用标准化的橡胶-金属减振器,如 JP 型平板式减振器、JW 型碗形减振器,图 5-21 是这两种减振器的结构图。

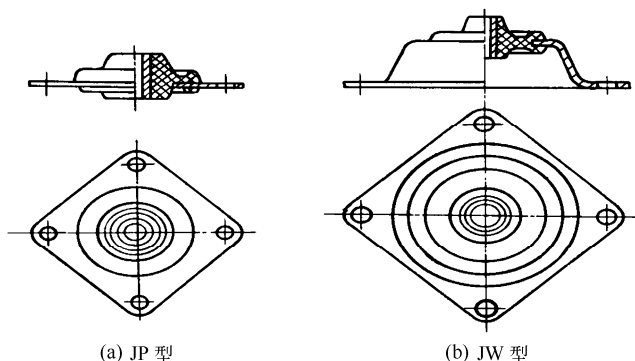


图 5-21 JP 型平板式减振器和 JW 型碗形减振器的结构图

JP 型和 JW 型性能基本相同,仅结构外形上有区别。这两种减振器额定载荷范围是 4.5~157.5N,在常温和额定负荷下,垂直方向静压缩位移为 1.2~2.0mm,其固有频率可查表求出。

#### (1) 硬度

用于减振器的橡胶肖氏硬度范围为 30~70。橡胶的疲劳现象不明显,实验表明,经 30 万次振动后,其弹性模量几乎没有变化。

#### (2) 温度

橡胶材料对温度比较敏感,在不同的温度下橡胶的弹性模量会发生变化。橡胶材料的弹性模量通常是在常温下给出的,如果设备的环境温度变化较大,在计算弹性模量或刚度时,应将求得的参数乘上温度影响系数,所得修正参数才是橡胶材料在实际环境中的性能参数。然后根据材料受温度影响的程度,判断其是否适应设备在不同环境中的使用要求。

天然橡胶的性质受环境条件影响大,当温度低至 $-60^{\circ}\text{C}$ 时,橡胶硬度显著增加,失去隔振作用;当温度高于 $+60^{\circ}\text{C}$ ,表面产生裂纹并逐渐加深,最后失去强度。此外,天然橡胶耐油性差,对酸和臭氧等反应敏感,容易老化,应定期更换。上述缺点一部分已被人工橡胶所克服,例如丁腈橡胶可在油中使用,硅橡胶的使用温度可提高到 $115^{\circ}\text{C}$ 。

由电子设备的使用温度条件,可以明确所需减振器的工作条件。一般橡胶减振器的工作温度

为 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 。过冷橡胶硬化, 过热则橡胶软化。

### (3) 形状系数

弹性模量与橡胶的相对变形、外形尺寸有关。根据橡胶的使用状态, 将其表面分为约束面与自由面。约束面为加载面, 在加载过程中, 该面不变形; 自由面是非加载面, 该面在加载时产生变形。约束面积与自由面积两者的比值称为形状系数。

相同的橡胶材料, 形状系数不同其弹性模量也不同。在实验中, 将测量所得的与形状系数有关的弹性模量称为表观弹性模量。

形状系数愈大, 则橡胶的总硬度愈大。当橡胶减振器形状不太复杂时, 其弹簧刚度可直接用计算方法求得。当形状复杂时, 一般是将其分解成若干简单形状, 分别求出各简单形状的刚度值, 然后组合成减振器的刚度。

### 2. 橡胶成型技术

橡胶制品的主要原料是生胶、各种配合剂, 以及作为骨架材料的纤维和金属材料, 橡胶制品的基本生产工艺过程包括塑炼、混炼、压延、压出、成型、硫化 6 个基本工序。橡胶的加工工艺过程主要是解决塑性和弹性矛盾的过程, 通过各种加工手段, 使弹性的橡胶变成具有塑性的塑炼胶; 再加入各种配合剂制成半成品。然后, 通过硫化, 具有塑性的半成品又变成弹性高、物理机械性能好的橡胶制品。

## 5.2.3 隔振缓冲系统的设计

### 5.2.3.1 隔振缓冲系统的设计依据

在大多数情况下, 电子设备都是机械环境中的受害对象。所谓电子设备隔振, 是指减弱振动、冲击等机械环境对设备的干扰或影响。因此, 除非另有说明, 本章所说的隔振, 均是指被动隔振。

常用的减振材料有软木、泡沫塑料、橡胶及金属弹簧等。电子设备使用最多的是橡胶减振器和金属弹簧减振器。当电子设备采用减振器隔振缓冲时, 通常是将一台设备看成一个质量, 此时设备与减振器所组成的力学模型就是一个单质体多自由度隔振系统。隔振缓冲系统的设计依据可归纳如下:

#### 1. 设备的物理数据

- (1) 设备的外形结构、安装图及相应的安装尺寸。
- (2) 设备的重量和重心位置。
- (3) 设备能够承受的振动量级以及需要达到的隔振效率。
- (4) 设备内部易损零部件的位置、允许承受的振动量级, 必要时, 应获取易振件的固有频率。
- (5) 减振器的支撑位置、支撑部位应具有足够的刚度和强度。

#### 2. 环境条件

(1) 机械环境 由电子设备的使用场合及运载工具, 可以明确设备所承受机械因素的性质和大小, 如振源的方向, 激振频率的带宽, 最低频率和实际频率, 位移和加速度振幅; 冲击谱或冲击脉冲形式, 包括峰值加速度, 持续时间以及冲击次数等。

(2) 气候环境 温度上、下限, 湿度, 盐雾, 臭氧, 太阳辐射等。

(3) 其他环境 例如油污、溶剂。

有些电子设备在设计阶段就已根据使用场所确定了它们的机械环境, 并有相应的标准或规范指定设备应承受的环境条件和严酷等级。

#### 3. 减振器资料

减振器资料, 包括减振器的安装尺寸、许用载荷范围、推荐的安装方式、静刚度、动态性能

(应与频率、载荷、适用温度等变化关系相联系)、阻尼比、寿命(包括疲劳限度、蠕变、老化、贮藏期限等)及使用、维护要求。

### 5.2.3.2 隔振系统的设计过程

单自由度系统和两个自由度系统的隔振设计较为简便,单质体多自由度系统的隔振设计较为复杂,因为系统的设计中必须考虑耦合振动情况。设计过程一般应包括以下步骤:

#### 1. 根据设备的结构选择减振器的支撑位置和方式

了解并分析设备对动力载荷的承受能力,最薄弱环节在设备中所处的位置;外形尺寸、形状;质量、转动惯量和惯性半径的大小及质心和中心惯量主轴的位置等。由电子设备的外形、尺寸、重量和重心位置等,可以决定减振器的位置,并确定支撑点(设备上固定减振器的点)数量。

安装减振器的设备支撑面应是整个结构最刚强的部位之一。为防止设备在静载荷和动载荷下发生弯曲变形,减振器的布置间距不宜太大,一般相邻减振器的轮廓间距不超过 0.5m。

如果各支撑点的载荷相差较大,则应采用同一型号但不同刚度的减振器。有的减振器可进行载荷调整,并且有较大的调整范围,这为电子设备的选用提供了方便。

#### 2. 根据非耦合条件选择减振器支撑的布置方式

通常印制电路板插件上装有很多元件,除了本身的固有频率外,它上面的元件都有各自的频率,因此在振动过程中相互间将出现耦合,从而使固有频率分布很宽。当受到激励干扰时,要想避开共振是很困难的。如果用诸如硅橡胶之类的物质封装整个印制电路板插件,使它成为一个整体,就从根本上消除了元件与印制板之间的相互耦合振动。这样再进行隔振也就比较容易了。

通常在设计时将仪器设备看作不变形的刚体,所以设备都有三个主惯性轴。在忽略阻尼的情况下,减振装置布置时应以设备的三个中心惯量主轴作为参考坐标系,对称于中心惯量主轴布置减振装置,以消除各自由度之间的耦合振动。

如图 5-22 所示,若将电子设备机壳看作一个刚体,则带有减振器的设备就是一个具有六

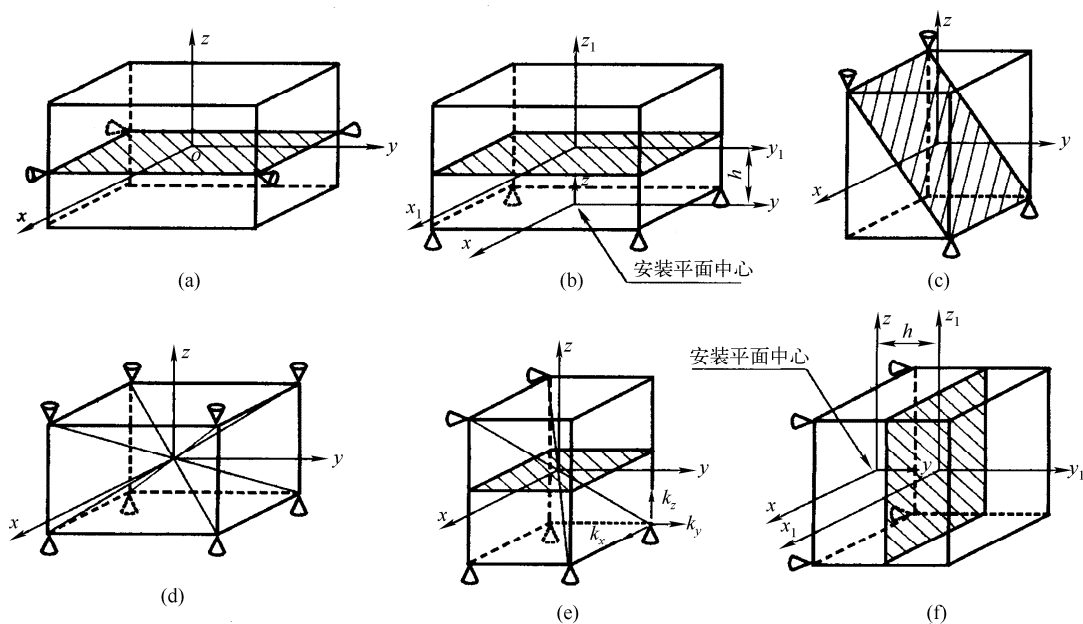


图 5-22 减振器的几种安装形式

个自由度的振动系统,即系统可沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标轴方向直线振动,也可以绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标轴作旋转振动,因而系统有六个固有频率。这六个方向的振动可能是相关的,也可能是彼此独立的,这取决于设备的重心位置、减振器的刚度和安装位置。

理想的非耦合布置方式是将减振器安装在设备的重心平面。图 5-23 为设备的主视图,重心在中心位置,两边底部安装了刚度相同的减振器。在静止状态下,若沿重心向下压物体,使沿  $Z$  轴方向有一个位移,外力移去后设备将沿  $Z$  轴上下振动。若用一力矩作用于设备,使之绕重心 ( $Y$  轴) 旋转一个角度,移去力矩后,设备将绕  $Y$  轴作旋转振动。因此上述两种运动互不相关,彼此独立。

图 5-24 中,当设备重心不在中心时,若同样使设备沿  $Z$  轴方向移动一个距离,再放开,这时设备不但有  $Z$  向的上下振动,而且有绕重心 ( $Y$  轴) 的旋转振动。如给设备一个力矩,则也会同时产生  $Z$  向的直线振动及绕重心的旋转振动,即这两个方向的振动是相关的。

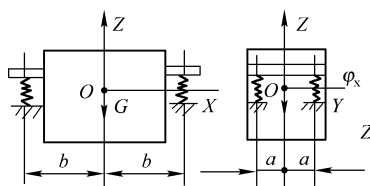


图 5-23 设备重心在中心

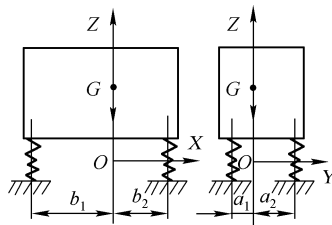


图 5-24 设备重心不在中心

(1) 减振器的安装,应力求系统的六个自由度的振动互不相关,而且这六个固有频率尽量接近,为此,减振器的安装应满足下列两个条件:

① 当设备从某个静止位置沿某个坐标轴平行移动一个距离时,各减振器对设备之作用力的合力应通过设备的重心。

② 当设备绕某个坐标轴转一微小角度时,各减振器的作用力合成为一力偶,力偶的作用平面与该轴垂直。

(2) 在实际应用时,不可能完全满足上述两个条件,这时应根据实际情况与可能来进行考虑,尽量减少其相关性。对于只能在设备底部安装减振器的情况,若使减振器的刚度配置分别对称于  $XOZ$ 、 $YOZ$  这两个惯性主轴平面,则系统沿垂直方向 ( $Z$  轴) 的运动就是非耦合运动。这种在安装中通过改变刚度布局实现解耦的方法是不难做到的。如果设备的重心较高(重心至支撑平面的距离大于某一惯性主轴平面上的两端交承点间距),可采取下列措施。

① 将设备中重量大的零部件尽量移至设备底部,或者在设备底部增加大质量块。

② 增加设备支撑面的尺寸和减振器的间距。

③ 在设备的上方加设侧面减振器,如图 5-25 所示。这种布置减振器的方案,六个自由度的相关都较小。

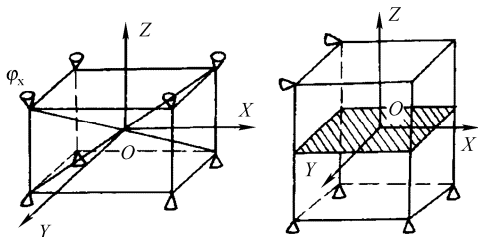


图 5-25 设备重心较高

#### 4. 求弹簧刚度

根据已求出的固有频率计算减振器承载方向的弹簧刚度,包括平衡设备重量所需的静变形。然后根

3. 根据设备能够承受的振动量级,选择隔振系统的固有频率

在激振频率带宽内,系统响应的最大值应不大于设备能够承受的振动量级,这是隔振系统设计的基本要求。应考虑实际工况中经常出现的激振频率,系统设计时应尽可能使固有频率远离这些激振频率。



据支撑形式,初步估算三个相互垂直的刚度比,并据此求出各自由度的固有频率,作出相应的传递率曲线。

### 5. 选用或设计减振器

在以上设计计算完成后,即可根据弹簧刚度和刚度比选择减振器。选择减振器时,除了减振器性能达到上述设计要求之外,还应考虑以下因素:

(1) 所选择的减振器是否满足气候环境和其他环境的要求 如果设备使用场合的温度变化不大,基本处于常温状态,并且在规定期限内,包括油类、溶剂污染以及潮湿、霉菌的侵蚀等不至于使性能产生明显的改变,则可选用橡胶减振器。否则应考虑选用金属型减振器。

(2) 减振器的共振参数是否满足性能要求 如果实际工况中或规定的激振频率范围很宽,经上述修改或优化后仍不能避开共振,或者即使计算得出的各自由度的固有频率远离了那些经常出现的激振频率,但电子产品的设计要求中规定了必须在可能出现的共振频率上进行较长时间的共振检查,那么,共振频率上的特性就是选择减振器必须考虑的重要参数。在这种情况下,选用具有“无谐振”特性的减振器可以较好地解决上述问题。

### 6. 试验验证

与一般机械设备不同,电子设备由于其自身结构非常复杂,要精确地描述设备内部各零部件结构关系的力学模型是非常困难的。如果结构设计中存在某些疏忽,就会在恶劣的机械环境中暴露许多薄弱环节。在隔振设计时,将电子设备当作质量处理,这对隔振系统来说是一种存在较大误差的假设。除非经过充分的实际工况的检验,上述设计计算尚不应作为最终结果来确认。

如果按实际工况来检验隔振设计的效果有困难,则应对设备和隔振系统进行机械环境的模拟试验,以验证隔振系统在可能遇到的所有实际工况中的有效性。当试验中发现系统、设备中的某些结构在某个频率上不正常,即使是没有明显地影响设备或系统的性能,也应将该频率视作“危险频率”,分析出现问题的原因,并对系统参数或结构作进一步修正,直到消除出现问题的因素,从而保证设备和系统在使用中的可靠性。

#### 5.2.3.3 背架隔振系统设计

安装在舰舱室内的电子设备,一般采用在设备底部安装四只相同特性的减振器,后背上部安装两只背架减振器的背架式安装隔振系统,以减小设备的摇晃,如图 5-22 所示。

用于显控台、机柜的背架式隔振系统,为了使垂向解耦,背架减振器的垂向刚度应为零;为了降低水平方向耦联振动,其自由状态时的水平刚度应在水平面内关于原点对称。

由振动分析可知,隔振缓冲系统期望的动态特性(即刚度和阻尼特性)主要要求是:

(1) 振动时应具有线性低刚度特性,从而使隔振系统具有低固有频率和较高的动态稳定性;在共振区具有大阻尼比,而在隔振区具有小阻尼比的变阻尼比特性,以实现无谐振峰特性。

(2) 在冲击时,应能吸收和耗散冲击能量,即具有较强的非线性特性。

(3) 背架减振器的水平刚度特性应关于静平衡位置的原点对称。为此,承载减振器通常不宜作为背架减振器。

根据上述分析及要求,无谐振峰背架式隔振系统由底部无谐振峰减振器和背部背架减振器组成。

GWF 型无谐振峰减振器是 GM 型金属干摩擦减振器改进型,为具有三轴向无共振峰( $\eta_v \leq 1$ )、能兼顾隔振、缓冲功能(冲击传递率 $\eta_{sn} \leq 0.8$ )的金属减振器。当实际承载量与公称载荷不一致时,其支撑高度及相应的阻尼力均可调整。

GBJ 型背架减振器是水平刚度和阻尼连续可调、专门与 GWF 型匹配使用的专用背架减振器。GBJ 背架减振器的垂向刚度近似为零,并且其水平刚度应与底部减振器的水平刚度相匹配。当两

台电子设备的重量相等时，它们可选用相同的底部减振器，当它们的重心高度不同或背架减振器的安装位置不同时，则可选用不同刚度特性的背架减振器与之相匹配。

### 1. 蠕变影响及其消除

蠕变，是指材料受到外力作用时发生永久性形变。橡胶等高分子材料制成的减振器，受设备自重及外激励作用，蠕变量往往超过 2mm，有时会甚至达到 5~6mm，较大的蠕变量使原先留给隔振系统的自由动变形空间变小，且关于静平衡位置不对称，此时可能会造成如下不良影响。

- (1) 如果预留的导线，软波导等自由变形长度不够长，冲击时引起扯断、开裂。
- (2) 设备下沉后，设备与缓冲垫之间的自由变形空间变小，冲击时易引起刚性碰撞。
- (3) 振动时，易引发自激振荡等不稳定现象。
- (4) 当各减振器的蠕变量不等时，设备会发生倾斜。

(5) 设备下沉后，背架减振器自由变形空间不够，会引起背架减振器的局部刚性碰撞和自激振荡现象。

因此，选用蠕变量较大的橡胶减振器时，应在设备底部与减振器上部之间加一个垫圈，预留足够的设备自由变形空间；预先留足导线及软波导可自由变形的长度；预先降低背架减振器的安装位置，预留下沉量等措施。同时还应选择蠕变量相等或相近的底部减振器，使其下沉量相近，以保持设备垂向直立状态。这些措施均可降低隔振系统对蠕变量的敏感度。

无谐振峰减振器已对主承载弹簧采取了消除蠕变量的预处理措施，使蠕变量  $\delta \leq 0.2\text{mm}$ 。同时确

保主承载弹簧受冲击时不并圈，从而避免了强冲击时过应力引起的永久变形。以上措施可避免诸如钢丝绳减振器、橡胶减振器等受强冲击后发生较大蠕变的缺点。

### 2. 减振器选型和固有频率相对偏差

要求电子设备的重心与支撑减振器的刚度中心完全重合是很难实现的，也就是说，在工程中，出现偏心现象是必然的。在图 5-26 中，当重心  $C$  偏离几何形心  $O$  有  $e_x$  和  $e_y$  时，这将会造成设备的动态稳定性下降，隔振效果变坏。

当各减振器相对固有频率偏差  $B_f$  满足下述条件

$$B_f = \left| \frac{f_{nl} - f_{ns}}{f_{nl}} \right| \times 100\% < 10\% \quad (5-7)$$

式中  $f_{ns}$ ——减振器实际固有频率； $f_{nl}$ ——减振器理论固有频率；则就可以将减振器的实际支撑刚度中心自几何形心  $O$  向重心  $C$  逼近，从而达到解耦设计的目的。当  $e_x$ 、 $e_y$  较大时，则应选用不同刚度的减振器与之相匹配，但外形尺寸和安装尺寸还需相同。

#### 5.2.3.4 设备质量、质心位置和各减振器承载量的简易测定

电子设备由离散质量组成，精确计算出质心位置，较为繁杂，现介绍一种简易测定方法供参考。测量工具由磅秤、两根角铁和千斤顶组成。

##### 1. 测量方法和步骤

(1) 先用两根角铁置于磅秤上，放上设备，称出设备总重量  $W$ 。

(2) 抽去一根角铁，按图 5-27 将设备底部安装减振器的 1、4 螺钉孔中心连线对准角铁直角边。将千斤顶支撑在 2、3 螺钉孔

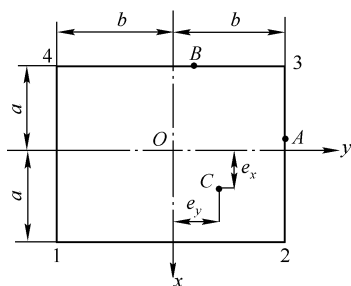


图 5-26 重心位置求解示意图

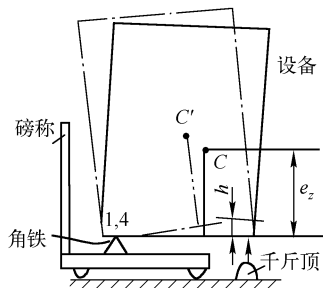


图 5-27 称重法示意图

中心连线中间附近位置(如图 5-26 中  $A$  点)。调节千斤顶, 使设备底平面调平, 之后测出  $W_{14}$ ,  $W_{14} = W_1 + W_4$ 。抬升千斤顶  $h$  高度, 测出  $W'_{14} = W'_1 + W'_4$ 。

(3) 将设备转  $90^\circ$ , 将角铁支撑在 1、2 螺孔中心连线, 千斤顶支承在 3、4 螺钉孔中心线的中间附近位置(如图 5-26 中  $B$  点)。设备调平, 称出  $W_{12} = W_1 + W_2$ , 将千斤顶升高  $h'$ , 测出  $W'_{12} = W'_1 + W'_2$ 。

## 2. 确定质心位置和各减振器承载量计算

(1) 求  $e_y$  将  $W_{14}$ 、 $W$  对 2、3 支撑点取矩

$$2bW_{14} \approx W(b - e_y) \quad (5-8)$$

则有

$$e_y = \frac{W - 2W_{14}}{W} \cdot b \quad (5-9)$$

(2) 求  $e_x$  将  $W_{12}$  和  $W$  对 3、4 支撑点取矩

$$2aW_{12} = W(a + e_x)$$

$$e_x = \frac{2W_{12} - W}{W} a$$

(3) 确定各支撑点实际载荷 将  $W_1$ 、 $W_2$  对  $C$  取矩, 且  $W_2 = W_{12} - W_1$  时, 可求出  $W_1$ :

$$W_1 = \frac{b - e_y}{2b} W_{12}$$

$$W_2 = W_{12} - W_1$$

$$W_{34} = W - W_{12}$$

$$W_4 = W_{14} - W_1$$

$$W_3 = W_{34} - W_4$$

(4) 求  $e_z$  设备水平放置时, 1、4 支点重量为  $W_{14}$ ,  $y_c = b - e_y$  (图 5-26) 重心高度为  $e_z$ 。重心  $C$  的水平面位置  $e_x, e_y$ 。设备抬高  $h$  后, 1、4 支点的重量  $W'_{14}$ 。设备重心  $c'$  在水平向投影为  $y'_c$ 。由图 5-28 可知

$$\sin \alpha = \frac{h}{2b} \quad (5-10)$$

$$R = 2b \cos \alpha$$

$$y'_c = y_c \cos \alpha + e_z \sin \alpha$$

$$y_c = b - e_y$$

对 2、3 支撑点取矩, 有

$$W'_{14} \cdot R = W \cdot y'_c \quad (5-11)$$

$$W'_{14} \cdot 2b \cos \alpha = W [y_c \cos \alpha + e_z \sin \alpha] \quad (5-12)$$

整理后有

$$e_z = \frac{2bW'_{14} - WY_c}{W} (\tan \alpha) \quad (5-13)$$

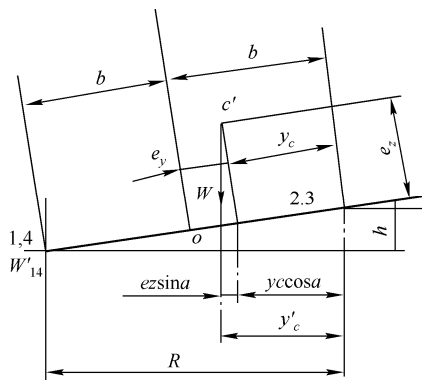


图 5-28 求解重心高度  $e_z$  示意图

将机柜转  $90^\circ$ , 支在 1、2 点上, 重复上述步骤也可求出  $e'_z$  进行对比校核。

## 第 6 章 电子设备电磁干扰基础

电子设备不可避免地在电磁环境（EME）中工作，因此，必须解决电子设备在电磁环境中的适应能力问题。一个设计理想的电子设备或系统应该既不辐射任何不希望的能量，又应该不受任何不希望有的能量的影响。

### 6.1 概 述

在人类诞生之前，地球上就存在着电磁现象。只是从麦克斯韦建立电磁理论、赫兹发现电磁波后的百余年来，电磁能才得到充分的利用。然而，各种电子设备在为人类造福的同时，也大大增加了周围环境中的电磁噪声。通过对电磁干扰产生的来源进行分析，我们可以发现，随着电子设备的不断增加，某些系统产生的有用信号对其他系统来说，却是一个干扰源，而且这种现象近年来正呈现不断增多的趋势。电磁干扰从甚低频到微波波段，无孔不入地辐射或传导至运行中的电子设备或系统以及周围的环境。人们常说的射频干扰（RFI, Radio Frequency Interference）是指无线电广播范围的干扰。

#### 6.1.1 电磁场基础

##### 6.1.1.1 宇宙电磁环境

宇宙电磁环境是个比较宏观和复杂的问题，本节只做简单介绍。

1964 年贝尔实验室的彭齐亚斯和威尔逊发现了宇宙微波辐射。他们在新泽西州克劳福特山上用灵敏的天线测定高银纬区（即银河平面以外的区域）发出的射电波强度，在 7.35cm 波长上，意外探测到一种微波噪声。无论天线转向何方，无论白天黑夜、春夏秋冬，这种神秘的噪声持续而稳定。天文学家听说后大喜过望，他们早就估计到大爆炸后每一个阶段的平衡状态都应该有一个对应的等效温度。彭齐亚斯和威尔逊发现的各向同性的 3K 辐射，正是宇宙膨胀、冷却到今天的温度。

太阳黑子实际并不黑，它是光球层上略微下陷的气体旋涡。因为温度比周围低千余度，于是显得稍黑稍暗。一般黑子的大小和地球相当。黑子出现的数目大约 11 年为一个周期。太阳的南北极从来见不到黑子，黑子总是先在太阳纬度 30 附近生成，然后向赤道移动。有趣的是，黑子常常成双成对地出现，而一对黑子又总会显示出彼此相反的磁极，如同一块巨大的马蹄形磁铁埋藏在太阳深处而恰恰露出两端。黑子是太阳活动的主要标志，它密切影响着地球上的气候、水文，以及动植物的生长。

太阳大气中最惊心动魄的爆发便是耀斑。这种色球层和日冕层之间耀眼的斑块直径达数亿公里，常常在几分钟之内来如闪电，去如逝波，骤然间释放出几百万枚百万吨级原子弹的能量，强大的辐射遍及光学波段和 X 线波段、紫外波段、射电波段，让地球上的每一个小小磁针颤抖不已。耀斑是最强大的“干扰台”，剧烈的磁暴能让地球上的短波通信中断、输电网络和变电设备失灵。1981 年 5 月南京紫金山天文台观察到两次奇异的双带太阳耀斑，曾导致全球无线电通信中断两小

时。1989年的太阳磁暴曾造成加拿大魁北克省水电系统崩溃,使北美广大地区数百万人蒙受损失,并让一颗卫星提前跌入较低轨道。对于太空中宇航员来说,突如其来的太阳耀斑则是需要特别防护的致命危险。平均大约4~5年,强大的耀斑便会出现一次。

太阳最外面叫日冕,弥散至600万千米。论亮度不及光球的百万分之一,论密度比地球上制造的任何真空还要空虚万倍,只有在日全食中才能看到它淡雅、素洁的珍珠色光晕。但这些异常稀薄的粒子却有百万度的高温。日冕层的大片黑暗区域叫冕洞,也是我们称为太阳风的“风洞”。高能量的质子、电子和少量重原子核沿着开放形的磁力线从这里“吹”出,“风力”可达每秒400km。

中子星表面是比钢还要强100亿亿倍的铁质外壳,温度达几百万度。由于中子星具有同样被压缩几十亿倍的强大磁场,自转轴和磁极又并不重合,猛烈抛射的螺旋电子流便会沿磁轴两端产生强大的同步加速辐射,使我们在遥远的地球上能收到这种脉冲射电信号。因此,中子星至今仍沿用着脉冲星的名称。据估计,银河系内有10万颗中子星,能在地球方向探到射电信号的在1000颗以下。

20世纪60年代美国科学家惠勒提出“黑洞”的概念。在黑洞的“史瓦西半径”内,逃逸速度超过每秒30万千米,连光也无法跑掉。别认为黑洞是个又黑又空的大窟窿,它具有质量、旋转与电荷,是宇宙中最密的物质和最实的实体,是万有引力登峰造极的杰作。黑洞直接关系到星系的起源。天鹅X-1是被找到的第一个黑洞,目前认定的黑洞已增加到30多个。

#### 6.1.1.2 地球磁场

地球磁场主要是偶极场,其北极在纬度 $78.6^\circ$ 、东经 $291.0^\circ$ ,其磁场南极在南纬 $66^\circ$ 、东经 $140^\circ$ 。在地磁赤道上,水平磁场强度 $H = 0.31\text{Gs}$ 。在地磁北极处垂直磁场强度为 $Z = 0.58\text{Gs}$ ,在地磁南极处垂直磁场强度为 $Z = 0.68\text{Gs}$ 。地磁场的场强分布基本上是轴对称的,磁轴和地轴不重合,它们之间偏移一个角度,称为磁偏角。磁极的位置是在缓慢周期性变化的,就现时而言,南极位于南极洲地区,北极位于北美洲。磁极处的场强最强,地磁赤道处的场强大约只有磁极处的一半。地磁有年变化、日变化等,可用各种指数来描述,如 $K_p$ 就是指三小时变化指数。

地球磁场在地球环境中电磁波的传播中起十分重要的作用。由于地球磁场的存在,在地球周围才有辐射带、磁层。在地球磁场磁化下的电离层对电磁波的传播来说是各向异性的媒质,它使电磁波在其中的传播问题变得复杂、多彩。由于地球磁场的存在,使在电离层中传播的电磁波分为寻常波和反常波,它们以不同的速度传播;在电磁波穿越电离层传播时,又可发现它的极化在不断地旋转,这就是Farady旋转。由于地球磁场的脉动引起了电离层的变化,如电离层暴,电离层的变化对通信有很大的影响。

地球的核心部分是导电的流体,随地球自转旋转运动,由于发电机效应,产生偶极子磁场,称之为地球磁场的“主场”,等于地球中心附近与地球自转轴略有倾斜角度的磁场偶极子所产生的场。地球有大气层,一定高度以上的大气是电离的,主要是电离层及其以外的磁层。地球磁场受到两种外来的影响:一种是太阳风的影响;另一种是电离层中电流系统的影响,这两种影响所产生的磁场称为“次场”,总的地球磁场是主场和次场的矢量和。

太阳扰动常常以太阳风增强为标志。由太阳发出的太阳风以超声波的形式射出,当它到达地球磁层时引起几个不同的现象:地球磁场受到影响,引起磁暴;在极区100km高度处,极光增强;电离层发生变化。

当太阳风与地球磁场相遇时,地球磁场被太阳风所包围而成为嵌入其中的穴,称为磁层。更具体地说,当超声速的太阳风到达地球附近时,产生一个无碰撞微波,通常称为弓激波。经过弓

形激波面减速后的太阳风等离子体流与地球磁场接触的交界面称为磁层顶；在磁层顶处两边的压力相等，磁层顶所包围的部分称为磁层（包括电离层），磁层内的磁场也就是地球磁场。磁层有复杂的结构，弓激波面与磁层顶之间的部分称为磁鞘，磁鞘内的等离子体是相当湍动的。在地球的两个磁极处各有一个开放区称为极隙区，从极隙区向外流出的低能等离子体称为极风。在磁尾中形成南北两个磁瓣，磁层顶与磁瓣之间有一个薄的边界层，称为磁幅，南北两个磁瓣之间的部分称为等离子片。磁层的向阳面，等离子体和磁力线受到压缩，但离地球较近的地方，地球的磁场较强，这里的磁力线基本上不受太阳风的影响，背阳一侧的磁层等离子体和磁力线延伸至很远处。地球磁场基本上不受太阳风影响的部分称为等离子体层，它随着地球的自转而旋转，称为共转。

从太阳耀斑开始发生约过四五十个小时后，强烈的太阳风的前弓激波到达向阳面的磁层顶，使向阳面的磁层受到压缩，地球磁场突然增强，称为磁暴急始，继之太阳风等离子体从极隙区和磁层顶不同区域进入磁层，使之处于强烈的扰动状态，结果引起地磁场水平分量大幅度下降，这一阶段称为磁暴的主相。在主相期间，磁层会发生一系列的爆发过程，称为磁层亚暴。磁层亚暴会对短波和长波无线电通信、埋地电缆通信和电力传输等产生干扰或破坏。

#### 6.1.1.3 地球电场

在地球上除了存在自然磁场外，还存在着电场，这也是一种自然场。地球上各地区的电场强度分布是随时间和地理位置而变化的。地电学（Geoelectricity）是研究地球电场的科学，藉以推导地球内部介质的物性、组成和分布状态。

地面带着负电，大气中含有净的正电荷，所以大气中时刻存在电场。大气电场的方向指向地面；强度随时间、地点、天气状况和离地面的高度而变。按天气状况可分为晴天电场和扰动天气电场。

在天空晴朗、风平浪静的天气条件下，地表面带负电，自然电场的电力线垂直于地面；但由于地形的不规则，使某些地区的场变形。因此某一地区的恒定电场强度是指该地区被认为是平面地形，在指定时间内重复若干次测量结果的平均值。电场强度的分布在地理中纬度地区的场强最高，随着向两极及赤道方向移动而减弱。就全球平均而言，晴天电场强度在陆地上为 120V/m，在海洋上为 130V/m。在工业区由于空气中存在高浓度的气溶胶，电场强度会增至每米数百伏。晴天电场随纬度而增大，称为纬度效应。晴天电场具有日变化和年变化，在海洋和两极地区，电场日变化和地方时无关，在世界时 19 时左右出现极大，04 时左右出现极小，振幅约达平均值的 20%。对陆地测量站而言，日变化和地方时有关，在地方时 04~06 时和 12~16 时出现极小值；07~10 时和 19~21 时出现极大值，振幅约达平均值的 50%。电场的年变化在海洋上不明显，陆地上测得冬季出现极大值，夏季出现极小值。

扰动天气电场是指存在着激烈的天气现象（如雷暴、雪暴、尘暴）时的大气电场。其特点是电场方向和数值上均有明显的不规则变化。如雷雨云下的电场可达  $-10^4\text{V/m}$ ，其中，负号表示电场方向向上。在层状云和积状云中，电场的大小和方向变化很大，通常出现的场强约为每米数百伏；雷雨云中则可达  $10^4\sim 10^5\text{V/m}$ 。

在自然界电场中，不能忽视大气中因宇宙辐射和太阳活动而引起的自由电荷，由于离子漂移而产生的离子电导会随着高度上升而增加，再加上高度增加而大气密度减少，这样促使离子数增加，而它们的自由行程变长。当高度达到足够大时，电导就会增高到使大气层变成类似于导体的电离层，这就是在海拔高度 500km 处存在的大气电离层，按目前的估计，电离层至少伸展至 1000km 以上的高空，并与星际空间相连接。由此可以设想地球和这个电离层组成一个巨大的球形电容器。

电荷之间的相互作用是通过电场传递的,或者说电荷周围存在有电场;在电场中的任何带电体,都受到电场的作用力。大气中的电荷在电场作用下沿电场方向移动,形成一个恒定的电流流入大地。从而把正电荷输送到地球上。对整个地球来说可产生 15kA 数量级的电流,大电流入地时,地中会出现很高的地电位;当有足够高的电压加到附近金属管线外围的绝缘层上时,将出现电弧,并使绝缘穿孔,甚至引燃起爆,因此必须保证一定的隔距或采用有效的防护措施。

### 6.1.2 电磁发射基础

移动的电荷产生电流,而电流能建立磁场;一个时变的电场会伴随着产生磁场,一个时变的磁场也会产生电场。换言之,时变的电场和磁场会耦合在一起而产生电磁场。在空间传播的周期性变化的电磁场,就是电磁波,电磁波本身载有电磁能量。当场源的电流或电荷随时间变化时,就有一部分电磁能量进入周围空间,这种现象称为电磁能量的辐射。

电磁波包括长波、中波、短波、超短波和微波。对于长、中、短、超短波电磁辐射,我们用电场强度来表示;对微波电磁辐射,我们用功率密度来表示。微波频率为 300MHz~300GHz,相应波长为 1m~1mm 范围内,微波的频率高、频带宽、信息量大、波长短、定向性和分辨能力高,它在雷达、通信、医疗、食品加工等领域得到了广泛的应用;但人们在学会利用微波的同时,微波给人类带来的危害在电磁辐射中是最大的,这一点不容忽视。

传输无线电波的媒质主要有地表、对流层、电离层等。这些媒质的电特性对不同频段的无线电波的传播有着不同的影响。根据其主要影响可将电波传播方式分为以下几种:

(1) 地面波传播 无线电波沿着地球表面从发射点传播到接收点,称为地面波传播,也称为表面波传播,信号比较稳定;但电波频率愈高,随距离的增加衰减愈快。因此,这种传播方式主要适用于长波和中波波段。

(2) 天波传播 电波通过高空电离层的反射传播到接收点。长、中、短波都可以利用天波进行远距离通信。

(3) 视距传播 如果收、发天线离地高度远大于波长,电波直接从发射天线传到接收点(有时有地面反射)。视距传播仅限于视线距离以内。微波接力电路和卫星通信电路的电波传播属于这种模式。

(4) 散射传播 利用对流层或电离层中介质的不均匀性或流星通过大气时的电离余迹对电磁波的散射作用来实现超视距传播。这种传播方式主要用于超短波或微波远距离通信。

(5) 波导模传播 指电波在电离层下缘和地面所组成的同心球壳形波导内的传播。长波、超长波或极长波利用这种传播方式能以较小的衰减进行远距离通信。

#### 6.1.2.1 电偶极子的辐射场

电偶极子是指一段载有高频电流的短导线。短是指其长度 $\Delta l$ 远小于所辐射的电磁波的工作波长,这时导线上各点电流的振幅和相位可视为相同。虽然实际的天线上各处电流的大小和相位不同,但其上的电流分布可以看成是由许多首尾相连的一系列电偶极子的电流组成;而各电偶极子上的电流可分别看作常数,因此电偶极子也称为电基本振子、电流元或时变电偶极子。

假设沿长度方向上的电流是均匀的、导线长度 $\Delta l$ 比场中任意点与电偶极子的距离小得多,即场中任意点与导线上各点的距离可认为是相等的。偶极子经传输线接于高频源上,如图 6-1 (a) 所示。

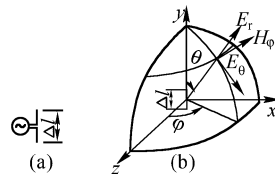


图 6-1 电偶极子辐射源

高频源的传导电流在偶极子两端会中断, 但偶极子两臂之间的位移电流与之构成了环路。

将电偶极子中心置于直角坐标原点,  $\Delta l$  沿  $y$  轴方向安放, 如图 6-1 中 (b) 所示。设电偶极子上电流作余弦 (或正弦) 变化, 那么, 电偶极子在介电媒质中产生的电磁场亦是时间的余弦 (或正弦) 函数。自由空间的电荷密度、传导电流密度以及电导率均为零, 麦克斯韦方程的微分形式可表达为

$$\begin{cases} \nabla \times \dot{H} = j\omega\varepsilon\dot{E} \\ \nabla \times \dot{E} = -j\omega\mu\dot{H} \\ \nabla \cdot \dot{B} = 0 \\ \nabla \cdot \dot{D} = 0 \end{cases} \quad (6-1)$$

式中  $\dot{H}$  为磁场强度 (A/m);  $\dot{E}$  为电场强度 (V/m);  $\dot{B}$  为磁感应强度 (T);  $\dot{D}$  为电位移矢量 ( $\text{Q/m}^2$ )。

由上述方程组可解得电偶极子周围的电磁场。电偶极子延长线上一点的场强与电偶极子电偶极矩的 2 倍成正比, 与该点离电偶极子中心距离的 3 次方成反比, 方向与电偶极矩方向相同。

### 1. 近区场

通常把场点至源点的距离  $r = \lambda/(2\pi)$  为远近场的分界点, 与偶极子相距为  $r < \lambda/(2\pi)$  的区域作为近场区处理。

近区中, 时变电偶极子的电场复振幅与静态场的“静”电偶极子的电场表达式相同; 磁场表达式则与静磁场中用毕奥-沙伐定律计算的一段线电流产生的磁场的表达式相同, 故电偶极子的近区场与静态场有相同的性质, 因此称为似稳场 (准静态场)。此外, 近区中电场与磁场有  $\pi/2$  的相位差, 因此其平均坡印廷矢量为零, 也就是说, 电偶极子的近区场没有电磁能量向外辐射, 电磁能量被束缚在电偶极子附近, 故近区场又称为束缚场或感应场。

### 2. 远区场

远区中, 电场与磁场在时间上同相, 因此平均坡印廷矢量不等于零, 这表明有电磁能量向外辐射, 辐射方向是径向, 故把远区场称为辐射场。电偶极子远区场有以下特点:

- (1) 电偶极子的远区场是横电磁波 (TEM 波), 又称平面电磁波。
- (2) 远区辐射场是球面波, 又称非均匀平面波。

## 6.1.2.2 磁偶极子的辐射场

磁偶极子也被称为磁基本振子, 是一个半径为  $a$  ( $a \ll \lambda$ ) 的细导线小圆环, 载有高频电流, 如图 6-2 (a) 所示。当此细导线小圆环的周长远小于波长时, 可以认为流过圆环电流的振幅和相位处处相同。

如图 6-2 (b) 所示, 磁偶极子的电场强度矢量与磁场强度矢量互相垂直, 这一点和电偶极子的电磁场相同。

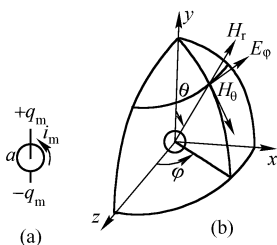


图 6-2 磁偶极子

### 6.1.2.3 两类源在远近场的特性比较

#### 1. 传播特性

两类源在远近场的场特征及传播特性均有所不同, 具体内容见表 6-1。



表 6-1 两类源的场与传播特性

场源类型	近 场		远 场	
	场 特 性	传 播 特 性	场 特 性	传 播 特 性
电偶极子	非平面波	以 $1/r^3$ 衰减	平面波	以 $1/r$ 衰减
磁偶极子	非平面波	以 $1/r^2$ 衰减	平面波	以 $1/r$ 衰减

近场区的电场和磁场方向处在以场源为中心的大曲率半径球面上。在电偶极子的近场区，感应电场强度按  $1/r^3$  规律减小，磁场强度按  $1/r^2$  的规律减小；在磁偶极子的近场区刚好相反，感应磁场强度按  $1/r^3$  规律减小，电场强度按  $1/r^2$  规律减小。因此在近场区测量电磁干扰，数据对距离十分敏感，不但要分别记录各测量点的电场强度和磁场强度，还应注明测量距离和测量天线的规格。在电子设备结构设计中，大部分设备内的布局属近场范围，有意识地利用空间距离衰减，就可降低对屏蔽设计的要求。从电子设备防干扰出发考虑布局，是效费比提高的一项措施。

理想的电偶极子和磁偶极子是不存在的。杆状天线及电子设备内部的一些高电压、小电流元器件等场源，都可视作等效的电偶极子场源，其近场区的电磁场以容性高阻抗电场为主。环状天线和电子设备中一些低电压、大电流元器件及电感线圈等场源可视作等效的磁偶极子场源，其周围电磁场呈现感性低阻抗磁场的特征。这些对电子设备防干扰故障诊断有指导意义。

在远场区电磁场为横电磁波，只有与传播方向垂直的两个场分量，在传播方向没有场分量。图 6-3 为平面电磁波中电场与磁场的瞬时分布。

平面电磁波具有下列特性：

- (1) 电磁波的两个场分量，即电场分量与磁场分量在空间相互垂直，且在同一平面上。
- (2) 电场和磁场在时间上同相位。
- (3) 电磁波能量的传播方向由坡印廷矢量确定。

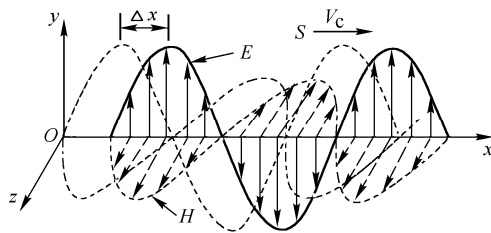


图 6-3 平面电磁波中电场与磁场的瞬时分布

(4) 电场与磁场强度均与离开场源的距离成反比，防干扰测试时常利用这种关系进行电磁发射极限值转换。

$\lambda/2\pi$ 附近的区域，或近似  $1/6$  波长的区域，是近场和远场之间的传输区域。平面波总是假设是在远场，当分别考虑电场波或磁场波时，则假设是在近场。

## 2. 波阻抗

波阻抗是电磁波中电场分量与磁场分量之比，即

$$\dot{Z} = \frac{\dot{E}}{\dot{H}} \quad (6-2)$$

场源不同、远近场不同，则波阻抗也有所不同，表 6-2 给出了波阻抗的特性。

由波阻抗表达式可见，无论是电偶极子还是磁偶极子，它们在近场区的阻抗都是虚数，即近场区

的电场与磁场相位相差  $90^\circ$ ，存在能量交换。其次，两种偶极子的波阻抗在量值上都是频率的函数，

表 6-2 两类源的波阻抗

场源类型	波阻抗 ( $\Omega$ )	
	近场	远场
电偶极子	$Z_{en} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0 r}$	$120\pi$
磁偶极子	$Z_{mn} = j\omega\mu_0 r$	$120\pi$

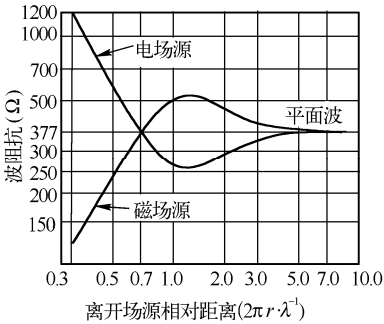


图 6-4 电偶极子和磁偶极子的空气波阻抗

但在变化规律不同。表达式中代入  $\epsilon_0$  及  $\mu_0$  值计算后可知，电偶极子的阻抗值高于磁偶极子的波阻抗（见图 6-4），所以前者是容性耦合的高阻抗场，后者是感性耦合的低阻抗场。将近场区的电场、磁场瞬时波形画出，就得到如图 6-5 所示的坡印廷矢量图。由于  $E_0$  与  $H_0$  相位差  $90^\circ$ ，当  $E_0$  为最大值时， $H_0$  为零，坡印廷矢量为零；若  $t_1$  时刻的坡印廷矢量  $S_1$  为正向传送，则到  $t_2$  的  $S_2$  就反向传送，表明感应的电磁场能量在  $r$  方向作往返振荡。

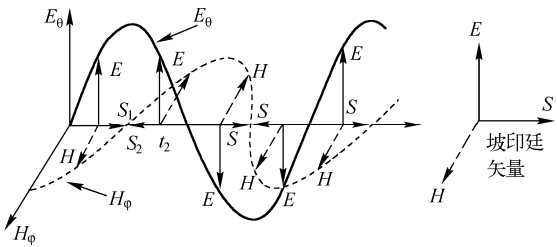


图 6-5 近场区的坡印廷矢量图

在近场，波阻抗由辐射源特性决定。小电流、高压电辐射体（如棒）主要产生高阻抗的电场，而大电流、低电压辐射体（如环）主要产生低阻抗磁场。如果辐射体阻抗正好约  $377\Omega$ ，那么实际在近场能产生平面波，这取决于辐射体形状。

综上所述，近场区与远场区的波阻抗有明显的区别。分析金属板的电磁屏蔽效能时，正是这种材料界面上波阻抗的差异导致了反射损耗，因此波阻抗是屏蔽效能计算中极重要的一个参数。进入远场区之后，波阻抗将趋向恒定的  $377\Omega$ 。

3. 能量密度

能量密度包括电场分量能量密度和磁场分量能量密度，通过对由同一场源所产生的电场、磁场分量的能量密度进行比较，可以确定场源在不同区域内何种分量占主要成分，以便确定具体的屏蔽分类。

表 6-3 给出了两种场源在远、近场的能量密度。从表中可以看出，两类源的近场有很大的区别，电偶极子的近场能量主要为电场分量，可忽略磁场分量；磁偶极子的近场能量主要为磁场分量，可忽略电场分量；两类源在远场时，电场、磁场分量均必须同时考虑。

表 6-3 两类源的能量密度

场源类型	能量密度比较	
	近场	远场
电偶极子	$W_E \gg W_H$	$W_E = W_H$
磁偶极子	$W_E \ll W_H$	$W_E = W_H$

6.1.2.4 天线基础

在电子系统中，称发射或接收电磁波的装置为天线。天线的形式大致可分为线天线和面天线两大类，它是无线电通信、导航、雷达、测控、遥感、射电天文、电子对抗及信息战等民用和国防系统必不可少的组成部分。天线被用来把发射机电路产生的电流和电压转换成在空中传播的电磁场，空间电磁波的场源是天线上的时变电流和电荷。严格地说，天线上的电流和由此电流激发的电磁场是相互作用的，天线电流激发电磁场，电磁场反过来影响天线上电流的分布。

增益是天线系统的最重要参数之一，天线增益的定义与全向天线或半波振子天线有关。全向

辐射器是假设在所有方向上都辐射等功率的辐射器，在某一方向的天线增益是该方向上的场强。

### 1. 方向图

天线的辐射电磁场在固定距离上随角坐标分布的图形，称为方向图。用辐射场强表示的称为场强方向图，用功率密度表示的称为功率方向图，用相位表示的称为相位方向图。天线方向图是空间立体图形，但是通常应用的是两个互相垂直的主平面内的方向图，称为平面方向图。在线性天线中，由于地面影响较大，都采用垂直面和水平面作为主平面。在面型天线中，则采用  $E$  平面和  $H$  平面作为两个主平面。归一化方向图取最大值为 1。

在方向图中，包含所需最大辐射方向的辐射波瓣叫天线主波瓣，也称天线波束。主瓣之外的波瓣叫副瓣或旁瓣或边瓣，与主瓣相反方向上的旁瓣叫后瓣。全向天线水平波瓣和垂直波瓣图，其天线外形为圆柱型，见图 6-6。定向天线水平波瓣和垂直波瓣图，其天线外形为板状，见图 6-7。

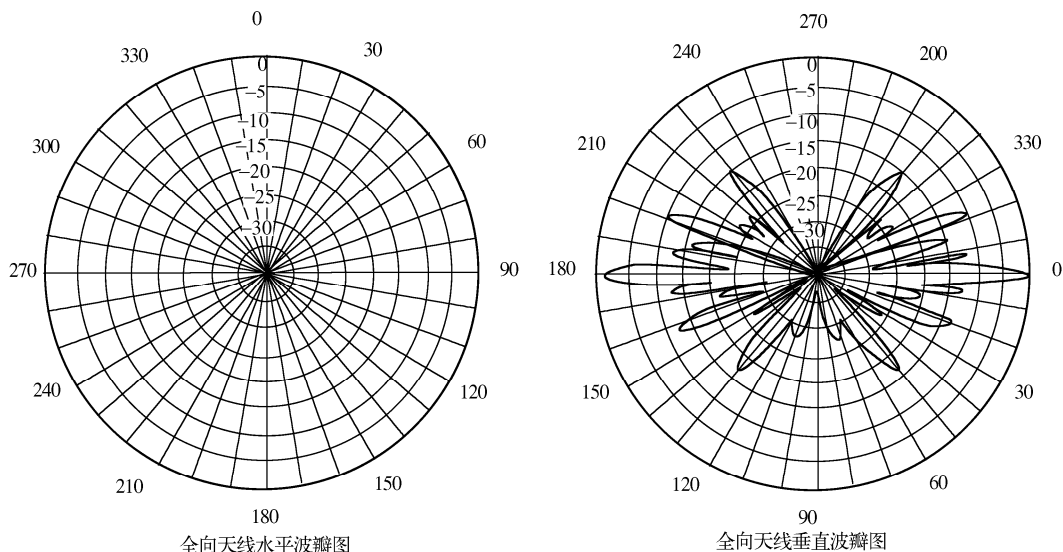


图 6-6 全向天线波瓣示意图

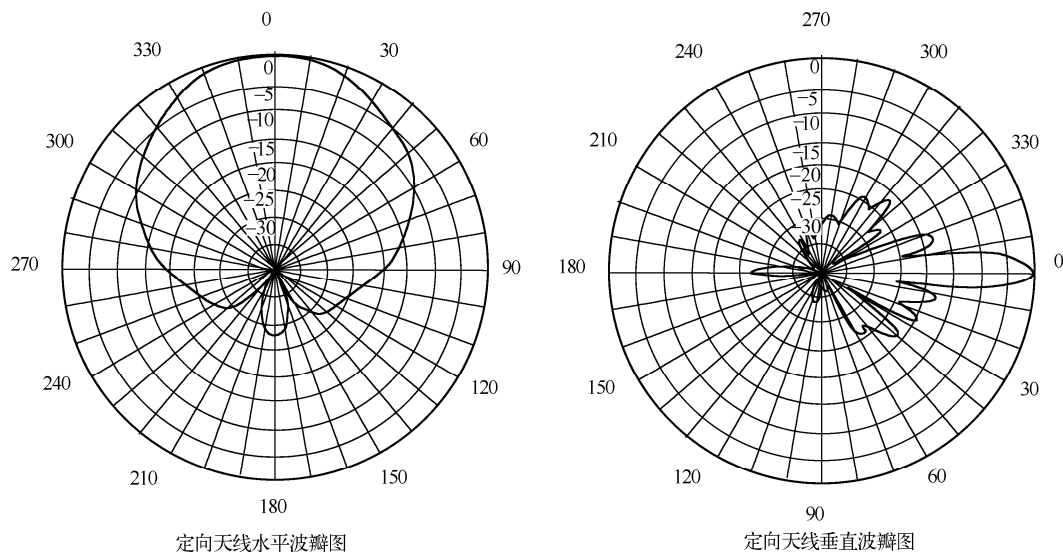


图 6-7 定向天线波瓣示意图

通常会用到天线方向图的以下一些参数：

- (1) 零功率波瓣宽度，指主瓣最大值两边两个零辐射方向之间的夹角。
- (2) 半功率点波瓣宽度，指最大值下降到 0.707（即下降 3dB）点的夹角。
- (3) 副瓣电平，指副瓣最大值和主瓣最大值之比。

## 2. 极化

极化是描述电磁波场强矢量空间指向的一个辐射特性，当没有特别说明时，通常以电场矢量的空间指向作为电磁波的极化方向，而且是指在该天线的最大辐射方向上的电场矢量来说的。电场矢量在空间的取向在任何时间都保持不变的电磁波叫直线极化波；有时以地面作参考，将电场矢量方向与地面平行的波叫水平极化波，与地面垂直的波叫垂直极化波。由于水平极化波和入射面垂直，故又称正交极化波；垂直极化波的电场矢量与入射平面平行，称之为平行极化波。电场矢量和传播方向所构成的平面叫极化平面。

电场矢量在空间的取向有的时候并不固定，电场矢量端点描绘的轨迹是圆，称为圆极化波；若轨迹是椭圆，称为椭圆极化波；椭圆极化波和圆极化波都有旋相性。

不论圆极化波或椭圆极化波，都可由两个互相垂直的线性极化波合成。若大小相等合成圆极化波，不相等则合成椭圆极化波。天线可能会在非预定的极化上辐射不需要的能量，这种不需要的能量称为交叉极化辐射分量。对线极化天线而言，交叉极化和预定的极化方向垂直。对于圆极化天线，交叉极化与预定极化的旋向相反。所以交叉极化又称正交极化。

## 3. 天线主要技术指标

(1) 电压驻波比（VSWR） 天线输入阻抗与特性阻抗不一致时，产生的反射波和入射波在馈线上叠加形成驻波，其相邻电压最大值和最小值之比就是电压驻波比。电压驻波比过大，将缩短通信距离，而且反射功率将返回发射机功放部分，容易烧坏功放管，影响通信系统的正常工作。

(2) 前后比（F/B） 该指标是天线的后向  $180^\circ \pm 30^\circ$  以内的副瓣电平与最大波束之差，用正值表示。一般天线的前后比在 18~45dB 之间。

(3) 端口隔离度 对于多端口天线，如双极化天线、双频段双极化天线，收发共用时端口之间的隔离度应大于 30dB。

(4) 回波损耗 指在天线的接头处的反射功率与入射功率的比值。回波损耗反映了天线的匹配特性。

(5) 无源互调（PIM） 指接头、馈线、天线、滤波器等无源部件工作在多个载频的大功率信号条件下，由于部件本身存在非线性而引起的互调效应。通常都认为无源部件是线性的，但是在大功率条件下无源部件都不同程度地存在一定的非线性，这种非线性主要是由以下因素引起的：不同材料的金属的接触；相同材料的接触表面不光滑；连接处不紧密；以及存在磁性物质等。

互调产物的存在会对通信系统产生干扰，特别是落在接收带内的互调产物将对系统的接收性能产生严重影响。因此，在 GSM 系统中对接头、电缆和天线等无源部件的互调特性都有严格的要求。

### 6.1.2.5 传输线基础

传输线是一种能在两点之间高效率地传输功率与信号的器材。在电子设备中，应用着传送电信号的各种传输线，它们可作为设备内部、设备间和系统间的互连线。场源产生的能量沿着传输线所引导的方向以横电磁波模式传播，即在传输过程中电场和磁场相互垂直，且都垂直于传输线导向的传播方向。这些传输线都只能在一定的频率范围内使用。例如双绞线和屏蔽双绞线，只适

用于 100kHz 以下的信号传输, 当频率达 1MHz 时, 传输损耗将大大增加。按结构形式的差异, 传输线通常可分为下列三类:

(1) 双线传输线 由一对相隔一定距离的平行导线构成。例如中波广播电台发射机到天线间所用的馈线。

(2) 平行板传输线 由两块被厚度均匀的介质片所隔开的平行导体所构成。在微波频段利用印制电路技术将平行板线制作在介质基片上, 构成微波电路中所用的微带线。

(3) 同轴线 由介质隔开的内导体与同轴外导体构成。同轴线的优点是将电场和磁场限制在内外导体间的介质区域内, 既减小了辐射损耗, 也屏蔽了外界干扰。内外导体间的介质可以是空气, 也可以是损耗小的介质材料。它的工作频率范围可从直流至特高频段, 在通信、电视及各种电子设备中得到广泛应用。

传输线与普通电路网络有一个明显的差别。普通电路网络的几何尺寸远小于工作波长, 因此网络中的电路元件可以认为是分立的, 并以集总参数来描述。电流通过集总电路元件时, 不用考虑电流在空间的变化。而传输线的长度通常已可与传输信号的波长相比拟, 甚至超过很多个波长。它的分布参数已直接影响到信号的传输, 这样就必须用分布于整个长度的电路参数来描述其自身的特性。

无限长传输线的输入阻抗是一个常数  $Z_C$ , 可用具有这一性质的较短的实际传输线代替, 如图 6-8 所示。无限长线被截取长度为  $l$  的一段, 剩余部分仍然是输入阻抗为  $Z_C$  的无限长线, 它可用阻抗值为  $Z_C$  的集总元件来代替。用  $Z_C$  端接的有限长度的传输线称为匹配传输线, 它具有类似于无限长线的性质。对无限长传输线推导出来的一些方程也适用于匹配传输线。

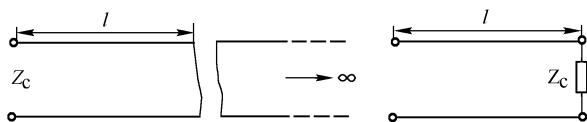


图 6-8 端接  $Z_C$  的有限长传输线代替无限长传输线

如果传输线终端的负载阻抗与传输线特性阻抗不相等, 那么传输线终端的不连续性会引起电压和电流的反射。这时入射波(从源端传出)和反射波(从负载传出)在线上将同时存在。两者在传输线上按时空关系代数合成, 结果形成有别于行波的另一种波——驻波。

图 6-9 利用矢量相加的办法显示了传输线上存在反射波时沿线的电压幅度变化规律。设在传输线上的位置 A 处入射波与反射波相位相同, 相加的电压幅度最大。经过  $\lambda/4$  的距离, 到位置 B 处入射波超前  $\pi/2$ , 反射波滞后  $\pi/2$ , 两者相位相反, 合成幅度最小。再经过  $\lambda/4$  的距离, 在位置 C, 入射波与反射波相位又相同。如此周而复始, 电压幅度沿线呈现驻留、波浪式的分布, 这就是驻波。幅度最大处称为波腹, 幅度最小处称为波节。波节(或波腹)的位置与传输线负载特性有关。

电压驻波的波腹与波节之间在空间相距  $\lambda/4$ , 即电流驻波的波腹与电压驻波的波节重合。电流驻波瞬时值的时间相位也与电压驻波瞬时值相位相差  $\pi/2$ , 表示传输线上的驻波能量实际以电场储能与磁场储能的形式在线上往复振荡。当无损耗传输线终端电阻件负载  $Z_L$  大于其自身特性阻抗  $Z_C$  时, 沿线的电压和电流分布如图 6-10 (a) 所示: 既有向终端电阻分量传输能量的行波, 又有传输线自身分布参数  $L_0$ 、 $C_0$  中储能交换过程引起的驻波。图 6-10 (b) 画出了无损耗传输线终端短路时沿线电压和电流的纯驻波。

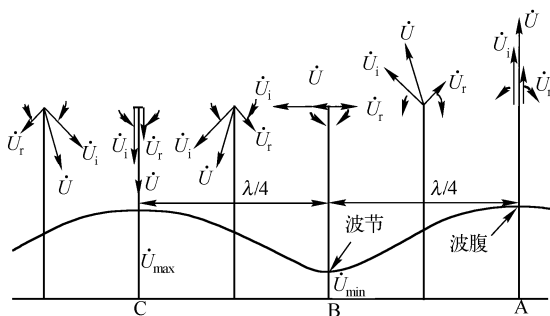


图 6-9 沿传输线的电压驻波分布规律

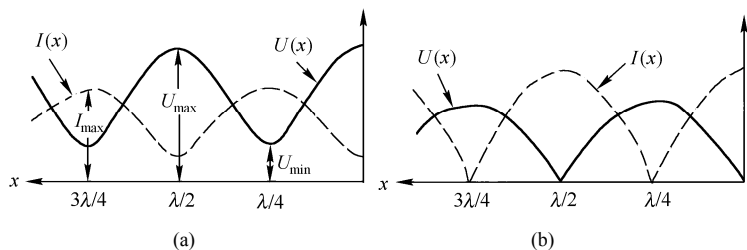


图 6-10 无损耗传输线沿线的行波和驻波分布

负载端的反射系数定义为反射波与入射波之比，它与负载阻抗及传输线特性阻抗有关。工程

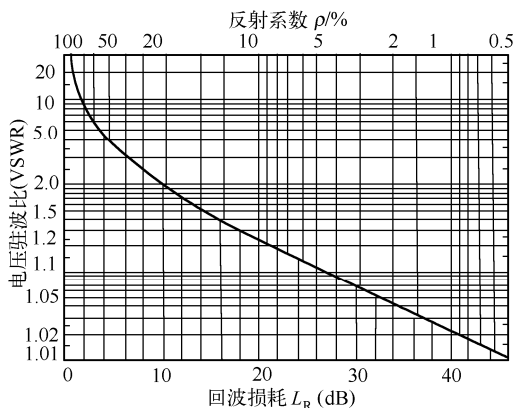


图 6-11 反射系数、回波损耗及电压驻波比

上用网络分析仪测得的反射特性通常以回波损耗表示。通常将有限长度的加载传输线上沿线电压驻波的最大值与最小值之比称为电压驻波比。反射系数、回波损耗、电压驻波比三者之间的量值关系可用图 6-11 表示，工程测量中进行换算极为方便。由图 6-11 可见，当驻波比等于 1.2 时，电压反射系数为 9%。驻波比小于 1.2 时，它在对数坐标中与反射系数呈线性相关：随着失配程度的增加，驻波比将急剧上升。因此对匹配状况较差的传输线，以电压驻波比表示更便于鉴别。

### 6.1.2.6 波导

双线传输线或同轴线所导引的是横电磁波，电磁波传播的相移常数与频率成正比，无色散效应。随着传输频率的进一步提高，普通传输线传输信号的泄漏急剧上升，这在同轴线内导体上反映特别明显。采用微带线虽在一定程度上可拓宽 TEM 波的传输上限，但侧向泄漏及功率容量受制约。到微波波段，只得放弃 TEM 波的传输模式，采用波导作为微波能量的导波载体。

波导实质上是一根空心金属管，其横截面一般为矩形或圆形，也可用其他形状，如正方形及双脊形等。波导管通常采用铜、黄铜和铝等良导体制造。波导内不再有同轴线那样的内导体，仅以空心金属管对电磁波起引导作用。为建立波导内场分布及波导壁面感应电流等概念，可借用传输线概念对矩形波导的形成和工作原理简单说明如下：

设有一对带状传输线如图 6-12 所示。当传输线长度远大于传输信号波长时，上下导体中的传

导电流必须经过上下导体间的位移电流构成闭合回路。该位移电流又会在水平面内产生闭合的磁场,也就是说随着传输信号波长的缩短,传输线上下导体之间的能量实际是以电场与磁场能量的形式向前传输的。

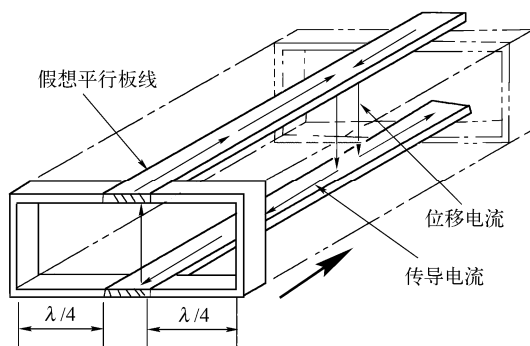


图 6-12 波导工作原理示意图

设在该传输线左右各加一根与传输信号波长对应的 $\lambda/4$ 短路线,则加短路线的输入阻抗无穷大,不影响传输线的工作。若在传输线两侧连续排上两排 $\lambda/4$ 短路线,传输线就演变成波导。但需注意,当孤立的 $\lambda/4$ 短路线变成连续的槽形围框后,必然阻断原围绕传输线导体的磁力线通路,所以波导内的场结构并不能以双线传输线间的场结构简单替代。随着传输波长的增加,原并接在双线传输线两侧“ $\lambda/4$ 短路线”的输入阻抗转呈感性。波长愈长,“ $\lambda/4$ 短路线”对中央平行板传输线的旁路作用愈强,传输损耗急剧增加。可见波导传输存在最大容许传输波长(截止波长)的问题。

从上述波导工作原理的分析可知波导传输的重要特点:

(1) 每种既定的波导都有最低可传输频率,低于此频率的电磁波就不能再在波导内传输,该频率称为截止频率。它只与波导的横截面尺寸及波导内介质的特性有关。

(2) 由于波导内没有同轴线那样的内导体,所以沿传播方向总存在一个场分量。波导内的电磁波只能以具有纵向场强分量的 TE 或 TH 模式传输,必然带来电磁波的色散问题。

(3) 波导波长始终大于同频率电磁波的自由空间波长,这是结构设计中十分有用的概念。

由图 6-13 (a) 可见,波导中的电场、磁场在  $y$  方向无变化。 $E_y$  在波导宽壁中央最大。若波导内传输的  $TE_{10}$  波功率较强,则  $Z_y$  就可能使空气击穿,在波导上下壁面间打火。解决这一问题的办法之一是在结构上要保证波导气密,使波导在充有干燥空气的条件下工作。图 6-13 (b) 表明,电场和磁场在波导传输方向每隔半个波长反相一次。 $E_y$  在垂直方向终止于波导的上下壁面,由它激起的传导电流将沿波导内表面流动。

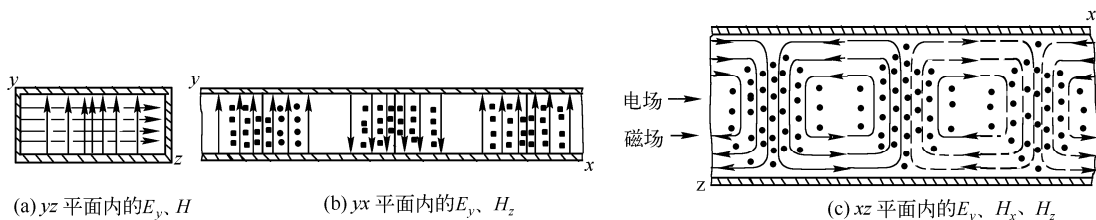


图 6-13 矩形波导内的  $TE_{10}$  模的场分布

图 6-14 是  $TE_{10}$  模在波导内表面激励的电流分布图。波导宽壁中央只有纵向( $x$  方向)表面电

流, 波导窄壁只有横向表面电流, 这对结构缝隙的处理有指导作用。

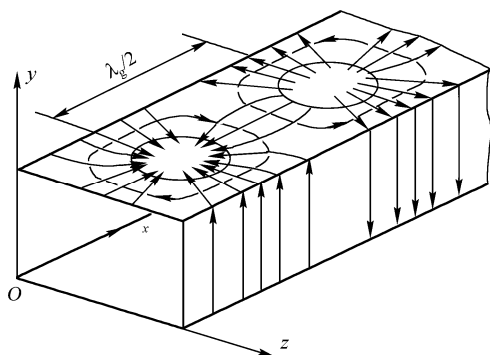


图 6-14 TE<sub>10</sub> 模在波导内表面激励的电流分布图

波导谐振可使屏蔽室内的辐射试验结果产生 40dB 的不确定性。此外波导谐振现象会导致屏蔽盒或机柜在谐振频率点附近的屏蔽效能大幅度下降。

波导壁不是理想导体, 电磁波沿波导传输时, 波导壁会感应出电流, 耗散被传输电磁波的部分能量。传输的电磁波频率低于波导截止频率时, 传输衰减急剧增大, 通风用的截止波导窗就是工作在这一区域。在单模工作区波导衰减最小。随着传输信号频率的升高, 受集肤效应和高次模的影响, 波导损耗将增加。

为减小波导传输主模时的衰减, 波导管均采用良导体制造, 如铜、铝、黄铜表面镀银等。加工时波导内壁表面的粗糙度要求很高, 传输频率愈高的波导, 表面粗糙度要求愈高。波导管内壁尺寸误差或突变会激起电磁波的反射和高次模。

### 6.1.3 电磁干扰基本术语

本节介绍电子设备防干扰学科的基本术语, 需要注意的是某些术语与电力、电子工程中的习惯理解不完全相同。

#### 6.1.3.1 基本概念

(1) 标准 是为了促进国际贸易, 对某个技术领域达成国际一致意见的出版物。

(2) 技术规范 在详细内容和完整性方面近似标准, 因为未达成一致意见或还不成熟, 未通过批准程序。技术规范规定了产品要求的特性, 例如质量水平、性能、安全或尺寸, 并包括可用于产品的要求, 像术语、符号、试验和试验方法、包装、标志或标签。

(3) 技术报告 除了未达成一致意见外, 技术报告还包括以下特点:

① 所涉及的内容仍处于技术发展阶段, 不适于作为国际标准出版, 但将来有可能成为国际标准。

② 将某个标准化组织的标准作为资料出版。

③ 包含与将要出版的国际标准不同内容的信息, 如特定技术领域的技术水平的调查信息。

(4) 系统 指若干设备、分系统、专职人员及可以执行或保障工作任务的技术组合。一个完整的系统, 除包括有关的设施、设备、分系统、器材和辅助设备外, 还包括在工作和保障环境中能胜任工作的操作人员。

当传输信号频率低于波导截止频率时, 电磁波一进入波导口就受到很大的衰减, 并在波导内传播过程中进一步被衰减。在屏蔽技术中, 正是利用波导的这一特性把波导管作为通风孔, 以抑制不希望的电磁波传播。

在屏蔽室乃至机柜、屏蔽盒的设计中, 对“波导谐振”的危害必须予以重视。屏蔽室相当于一段两端封闭的矩形波导, 其内部一旦有射频电磁场被激励, 该电磁场经过六个壁面的多次往复反射, 就可能由于屏蔽室腔体的电磁谐振作用而在空间形成起伏很大的驻波分布。有资料表明, 波



### (5) 分系统

① 作为整体起作用的许多装置或设备的组合，但并不要求其中的装置或设备独立起作用。

② 作为在一个系统内起主要作用并完成单项或多项功能的许多设备或分系统的组合。

以上两类分系统内的装置或设备，在实际工作时可以分开安装在几个固定或移动的台站、运载工具及系统中。需要注意的是，“系统”与“分系统”的概念是相对的，同一物理系统在某一环境中可能被认为是“分系统”，而在另一环境中也可能被认为是“系统”。例如，车载通信系统可以被认为是电子战系统的分系统，然而当其单独执行通信任务时又可以被认为是相对独立的系统。

(6) 设备 指作为一个独立单元进行工作，并完成单一功能的任何电气、电子或机电装置。

(7) 试样或受试设备 指待试验或正在试验中的装置、设备、分系统或系统。

(8) 电磁噪声 指一种明显不传送信息的时变电磁现象，它可能与有用信号组合。电磁噪声通常是脉动的和随机的，但也可以是周期的。

(9) 电磁干扰 (Electromagnetic Disturbance) 指任何可能引起装置、设备或系统性能降低，或者对有生命物质或无生命物质产生损害作用的电磁现象。电磁干扰可能是电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化。人们在生产及生活中使用的电子设备在工作的同时，往往会产生一些有用或无用的电磁能量，这些电磁能量影响处于同一电磁环境中的其他设备或系统的工作，这就是电磁干扰。可见，电磁干扰强调任何可能的电磁危害现象。

(10) 电磁干扰 (EMI, Electromagnetic Interference) 指任何能中断、阻碍、降低或限制通信电子设备有效性能的电磁能量。电磁干扰仅仅是电磁现象，即客观存在的一种物理现象，它可能引起设备性能的降级或损害，但不一定已经形成果。而电磁干扰强调这种电磁危害现象产生的结果。过去在术语上并未将物理现象与其造成的后果明确划分，统称为干扰 (Interference)。1990 年发布的 IEC50 (161) 才明确引入了 Disturbance 这一术语。为了明确与过去惯用的干扰一词的区分，中译文称为“干扰”。

对于电磁干扰与电磁干扰，平时人们不予严格区分，本书也按人们的习惯，统称为电磁干扰。

(11) 系统间干扰 指其他系统产生的电磁干扰对一个系统造成的电磁干扰。例如，雷达干扰飞机的导航系统。

(12) 系统内干扰 系统中出现的由本系统内部电磁干扰引起的电磁干扰。例如，汽车发动机系统对汽车内的无线电接收机的干扰。

(13) 电磁发射 (Electromagnetic Emission) 指从源向外发出电磁能的现象，即以辐射或传导形式从源发出的电磁能量。此处的“发射”与通信工程中常用的“发射”含义并不完全相同。既包含传导发射，也包含辐射发射，而通信工程中的“发射”主要指辐射发射；此处的“发射”常常是无意的，不存在有意制作的发射部件，一些本来做其他用途的部件（如电线、电缆等）充当了发射源的角色，而通信中则是精心制作发射部件（如天线等）。通信中的“发射”也使用 Emission，但更多的是使用 Transmission。

(14) 电磁辐射 (Electromagnetic Radiation) 指由不同于传导机理所产生的有用信号的发射或电磁干扰的发射。注意“发射”与“辐射”的区别，“发射”指向空间以辐射形式和沿导线以传导形式发出的电磁能量，而辐射发射 (Radiated Emission) 是通过空间传播的、有用的或不希望有的电磁能量。

(15) 无线电环境 无线电频率范围内的电磁环境，即在给定场所内所有处于工作状态的无线电发射机产生的电磁场总和。

(16) 性能降低 指装置、设备或系统的工作性能与正常性能的非期望偏离（向坏的方向偏离）。此种非期望偏离并不意味着一定会被使用者觉察。

(17) 静电放电 两个具有不同静电电位的物体，由于直接接触或静电场感应引起两物体间的静电电荷的转移。静电电场的能量达到一定程度后，击穿其间介质而进行放电的现象就是静电放电。

(18) 无源干扰 输电线路及其杆、塔，即使在未送电的条件下，也会对电磁波的传播形成影响（如对雷达信号、短波通信等），称为无源干扰。

(19) 电源干扰 经由供电电源线传输到装置上的电磁干扰。

(20) 机壳辐射 由设备外壳产生的辐射，不包括所接天线或电缆产生的辐射。

(21) 电压浪涌 沿线路或电路传播的瞬态电压波。其特征是电压快速上升后缓慢下降。

(22) 工频电场 主要存在于工频输电导线对大地之间，其电场强度取决于电压等级。直流输电线路则为一个纯的静电场。

(23) 工频磁场 由于工频频率很低、波长很长，因而距线路较远仍为近场，其磁场强度主要取决于导线的载流量。工频磁场强度随距离的增加衰减很快。

(24) 电晕 是由于导体表面的电位梯度过大，引起向空气中放电而产生的高频电磁噪声；其频谱的主要分量在几兆赫以下。

(25) 火花放电 指由于线路上局部的绝缘被破坏、绝缘子污秽或金属接触不良等而产生的放电；其频谱范围可高达百兆赫；其幅度变化范围很大，远大于电晕放电。

(26) 窄带发射 指带宽比电磁干扰测量仪带宽小的一种发射。

(27) 宽带发射 指能量谱分布足够均匀和连续的一种发射。当电磁干扰测量仪在几倍带宽的频率范围内调谐时，它们的响应无明显变化。

(28) 乱真发射（Spurious Emission） 指在必要发射带宽以外的一个或几个频率上的电磁发射。这种发射电平降低时不会影响相应信息的传输。乱真发射包括谐波发射、寄生发射及相互调制的产物，但不包括为传输信息而进行的调制过程在紧靠必要发射带宽附近的发射。

### 6.1.3.2 干扰控制

(1) 干扰度（Disturbance Degree） 指在所关注的环境中与特定电磁现象相对应的干扰电平范围内所规定的量化强度。这一术语的作用是使构成电磁环境的现象得到量化。必须注意，在概念上应将干扰度与严酷等级（Severity Level）区分开。严酷等级是用来描述试验的电磁信号强度的，而干扰度是用来描述环境的电磁现象的强度的。

(2) 抗扰度（Immunity to A Disturbance） 指存在电磁干扰的情况下，器件、设备或系统性能不降低条件下的正常运行能力。为实现系统内设备互不干扰、兼容运行，既要控制干扰源的电磁发射，又要提高受干扰对象的抗扰度。

(3) 电磁敏感性（EMS, Electromagnetic Susceptibility） 指存在电磁干扰的情况下，装置、设备或系统不能避免性能降低的能力。实际上，抗扰度与敏感性都反映的是装置、设备或系统的抗干扰能力，仅仅是从不同的角度而言。敏感性高，则抗扰度就低；反之亦然。

(4) 耦合路径 部分或全部电磁能量从规定源传输到另一电路或装置所经由的路径。

(5) 耦合系数 给定电路中，电磁量（通常是电压或电流）从一个规定位置耦合到另一规定位置，目标位置与源位置相应电磁量之比即为耦合系数。

(6) 接地电感器 与设备的接地导体串联的电感器。

(7) 抑制器 专门设计用来抑制干扰的器件。

(8) 关键点 指分系统中对干扰最敏感的点。它与灵敏度、固有的敏感度、任务目标的重要性以及所处的电磁环境等因素有关。实际上这是一个电气点,通常处于分系统输出级之前。

(9) 选择性 接收机分辨给定的有用信号与无用信号的能力或这一能力的度量。

(10) 交调 非线性设备、电网络或传播媒介中信号的相互作用所产生的无用信号对有用信号的调制。

(11) 电磁兼容性 20 世纪 40 年代提出的电磁兼容性概念,使电磁干扰问题由单纯的排除干扰逐步发展成为从理论、技术上全面控制用电设备在其电磁环境中发挥正常工作性能的系统工程。

什么是兼容呢?一般来说,“兼容”描述一种和谐的共存状态。

由于电磁干扰源的普遍存在,电磁干扰现象经常发生。如果在一个系统中各种用电设备能和谐地正常工作而不致相互发生电磁干扰造成性能改变或遭受损坏,人们就满意地称这个系统中的用电设备是相互兼容的。但是随着用电设备功能的多样化、结构的复杂化、功率加大和频率提高,同时它们的灵敏度也越来越高,这种相互包容兼顾、各显其能的状态很难获得。

电磁兼容性是电子、电气设备或系统的一种重要的技术性能。从电磁兼容的观点出发,除了要求电子设备或系统能按设计要求完成其功能外,还必须具有抵抗给定电磁干扰的能力,并有一定的安全余量;同时不产生超过规定限度的电磁干扰。只有对每一个设备作这两方面的约束,才能保证系统达到完全兼容。

电磁兼容是研究在有限的空间、时间和频谱资源等条件下,各种用电设备(广义的还包括生物体)可以共存,并不致引起降级的一门科学。电磁兼容性是指设备或系统在其电磁环境下能正常工作,并且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁干扰的能力。在工程实践中,人们往往不加区别地使用“电磁兼容”和“电磁兼容性”,且采用同一英文缩写 EMC。

我国国家军用标准 GJB72—85《电磁干扰和电磁兼容性名词术语》中给出电磁兼容性的定义为:设备(分系统、系统)在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态,即该设备不会由于受到处于同一电磁环境中其他设备的电磁发射而导致或遭受不允许的降级;它也不会使同一电磁环境中其他设备(分系统、系统)因受其电磁发射而导致或遭受不允许的降级。

美国电气与电子工程师协会(IEEE)给电磁兼容性下的定义是:一个装置能在其所处的电磁环境中满意地工作,同时又不向该环境及同一环境中的其他装置排放超过允许范围的电网扰动。

美国学者 Bernhard Keiser 曾把 EMC 定义为:“Electrical and electronic devices are said to be electromagnetically compatible when the electrical noise generated by each does not interfere with the normal performance of any of the others. Electromagnetic compatibility is that happy situation in which systems work as intended, both within themselves and in their environment.”

国际电工技术委员会的定义是:电磁兼容性是设备的一种能力,它在其电磁环境中能完成它的功能,而不致于在其环境中产生不允许的干扰。

电磁兼容的定义、理论和标准,已成为一个国家、一个地区、乃至世界范围内解决系统或设备兼容问题的基础。目前,电磁兼容学又进一步探讨电磁环境对人类及生物的危害,发现电磁干扰除影响电子设备的正常工作外,对人体健康也会造成有害的影响。研究电磁污染、电磁饥饿等一系列生态效应问题以及防护技术等也属于电磁兼容性范畴。因此,电磁兼容学又称为“环境电磁学”。

系统电磁兼容性(Systems EMC)也称为系统级电磁兼容性(System Level EMC),它分为系统之间的电磁兼容性和系统内部的电磁兼容性。

① 系统内的电磁兼容性。在给定系统内部的分系统、设备及部件之间的电磁兼容性称为系统内电磁兼容性，系统内公共阻抗的耦合、设备机壳间的耦合、机壳与电缆的耦合、天线间的耦合等是影响系统内电磁兼容性的主要因素。

② 系统间的电磁兼容性。某系统与它所处的电磁环境或其他系统之间的电磁兼容性称为系统间电磁兼容性，影响系统间电磁兼容性的主要因素有天线与天线的耦合、天线与电缆的耦合等。

(12) 静电敏感度 元器件所能承受的静电放电电压。

(13) 电磁敏感阈值 系统、分系统或设备不能正常工作的干扰临界电平值称为电磁敏感阈值。它是在全部工作频段内，受电磁干扰最敏感的频段和最敏感的频率上的干扰临界电平值。电磁敏感阈值是衡量系统、设备受电磁干扰的易损性参数，此值越低，说明系统、分系统、设备越容易受干扰。

(14) 辐射敏感度 指对造成设备降级的辐射干扰场的度量。

(15) 传导敏感度 指当引起设备不希望有的响应或造成其性能降级时，对在电源、控制或信号引线上的干扰信号电流或电压的度量。

(16) 敏感度门限值 指敏感设备受电磁干扰所呈现的不希望有的响应的最小电平。敏感度门限越大，设备的抗干扰能力就越强。因此敏感度门限值是进行防护性设计确定干扰允许值的基本出发点，干扰允许值必须小于能在敏感设备中引起响应的电平值，而且每个干扰允许值应该是在最敏感的频率和最危险的状态下获得的。

(17) 电磁环境电平 受试设备不通电时，在规定的试验地点和时间内，存在于周围空间的辐射和电网内传导信号及噪声的量值。

(18) 电磁兼容电平 指预期加在工作于指定条件的装置、设备或系统上规定的最大电磁干扰电平。

(19) 电磁发射限值 允许干扰源设备或分系统在工作时给周围环境带来的电磁发射电平值，设计时对干扰源规定电磁发射限值指标是控制电磁干扰源、保护电磁环境的有力措施。电磁发射限值包括辐射发射和传导发射。

(20) 发射裕量 装置、设备或系统的电磁兼容电平与发射限值之间的差值。

(21) 失效干扰电平 也称为失效准则，它是指系统和设备不允许接受的电磁干扰电平。当不允许的强电磁干扰电平进入系统后，会使电路或元件发生故障，这种故障可能是永久性失效或永久性恶化。因此失效干扰电平是系统所能接受的电磁干扰电平的极限值。

(22) 抗扰度电平 指将某给定的电磁干扰施加于某一装置、设备或系统而它仍能正常工作并保持所需性能等级时的最大干扰电平。也就是说，超过此电平，该装置、设备或系统就会出现性能降低。

(23) 抗扰度限值 指规定的最小抗扰度电平。“限值”是人为规定的参数，而“电平”是装置、设备或系统本身的特性。

(24) 抗扰度裕量 指装置、设备或系统的抗扰度限值与电磁兼容电平之间的差值。

(25) 电磁兼容裕量 指装置、设备或系统的抗扰性电平与干扰源的发射限值之间的差值。

(26) 电磁干扰安全系数 指敏感度门限与出现在关键试验点或信号线上的干扰之比。

上述部分相关术语之间的关系如图 6-15 和图 6-16 所示。

### 6.1.3.3 干扰测量

(1) 瞬态 在两相邻稳定状态之间变化的物理量与物理现象，其变化时间小于所关注的时间尺度。

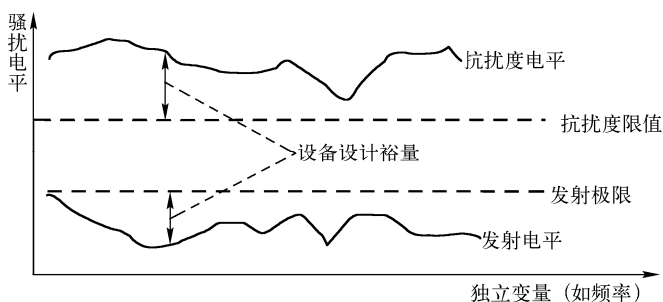


图 6-15 电子设备的限值与电平和独立变量的关系

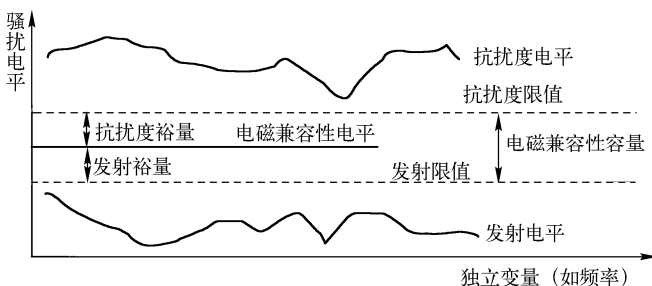


图 6-16 限值、电平、裕量与独立变量的关系

- (2) 脉冲 在短时间内突变, 随后又迅速返回其初始值的物理量。
- (3) 尖峰脉冲 持续时间较短的单向脉冲。
- (4) 猝发脉冲或振荡 一串数量有限的清晰脉冲或一个持续时间有限的振荡。
- (5) 上升率 一个量在峰值的 10%~90% 范围内, 随时间变化的平均速率。
- (6) 脉冲噪声 在某一特定装置或设备上出现的、表现为一连串清晰脉冲或瞬态的电磁噪声。
- (7) 连续噪声 对一个特定设备不能分解为一串清晰可辨的脉冲的电磁干扰。
- (8) 基波 一个周期量的傅里叶级数的 1 次分量。
- (9) 谐波 一个周期量的傅里叶级数中次数高于 1 的分量。
- (10) 谐波次数 谐波频率与基波频率的整数比。
- (11) 信噪比 规定条件下测得的有用信号电平与电磁噪声电平之间的比值。
- (12) 设备阻抗 从设备电源线远端看进去的设备输出阻抗。
- (13) 差模电压 一组给定的有源导线中任意两线之间出现的干扰电压。
- (14) 共模电压 每个导体与规定参考点 (通常是地或机壳) 之间的相电压的平均值。
- (15) 共模转换 由共模电压产生差模电压的过程。

(16) 同轴线的表面转移阻抗 同轴线内导体单位长度  $L$  的感应电压与同轴线外表面上的电流之比。

(17) 检波器的放电时间常数 从突然切断正弦输入电压到检波器输出电压降至初始值的  $1/e$  所需的时间。

(18) 接收机的过载系数 正弦输入信号最大幅值与指示仪表满刻度偏转时输入幅值之比, 对应于这一最大输入信号, 接收机检波器前置电路的输入/输出特性偏离线性应不超过 1dB。

(19) 峰值检波器 输出电压为所施加信号峰值的检波器。

(20) 吸收钳 能沿着设备或类似装置的电源线移动的测量装置, 用来获取设备或装置的无线电信号的最大辐射功率。

(21) 横电磁波室 一个封闭系统, 通常为矩形同轴线, 电磁波在其中以横电磁波模式传输, 从而产生供测试使用的规定的电磁场。

(22) 模拟灯 一种模拟荧光灯无线电信号阻抗的装置, 它可替代照明装置中的荧光灯以便对照明装置的插入损耗进行测量。

(23) 电流探头 在不断开导体并且不对相应电路引入显著阻抗的情况下, 测量导体电流的装置。

(24) 电磁干扰测量仪 指测量各种电磁发射电压、电流或场强的仪器。它实质上是按规定要求专门设计的接收机。

(25) 人工电源网络 串接在被试设备电源进线处的网络, 又称线路阻抗稳定网络。它在给定频率范围内, 为干扰电压的测量提供规定的负载阻抗, 并使被试设备与电源相互隔离。

(26)  $\geq$ 形网络 能够分别测量单相电路中共模及差模电压的人工电源网络。

(27) V形网络 能够分别测量每个导体对地电压的人工电源网络。V形网络可设计成用于任意导体数的网络。

## 6.2 电磁干扰源

当干扰严重时, 不仅要对所涉及的电子设备进行检查, 同时也要对干扰源进行检查。因此, 在解决电子设备防干扰问题时, 首先应对干扰源进行分析。

### 6.2.1 电磁干扰源的类型和性质

#### 6.2.1.1 电磁干扰源的分类方法

##### 1. 按存在区域分类

电子设备的内部及外部都存在着各种电磁干扰, 因此可以将电磁干扰源分为外部干扰源和内部干扰源。

(1) 所谓外部电磁干扰, 是指电子设备或系统以外的因素对线路、设备或系统的干扰, 这些电磁波是通过外壳、天线及各种输入馈线等途径输入设备内部的。

具体来说, 外部干扰包括以下几种:

- ① 外部的高电压、电源通过绝缘漏电而干扰电子设备或系统。
- ② 外部大功率设备在空间产生很强的磁场, 通过互感耦合干扰电子设备或系统。
- ③ 空间电磁波对电子线路或系统产生干扰。
- ④ 工作环境温度不稳定, 引起电子设备或系统内部元器件参数改变造成干扰。
- ⑤ 由工业电网供电的设备和由电网电压通过电源变压器产生干扰。

(2) 所谓内部电磁干扰, 是指设备内部电路单元之间、元器件之间及导线之间的电磁干扰。如电子设备内共用电源或地线造成的共阻抗干扰。具体来说, 内部干扰包括以下几种:

- ① 工作电源通过线路的分布电容和绝缘电阻产生漏电造成干扰 (与工作频率有关)。

- ② 信号通过地线、电源和传输导线的阻抗互相耦合，或导线之间的互感造成干扰。
- ③ 设备或系统内部某些元件发热，影响元件本身或其他元件的稳定性造成干扰。
- ④ 大功率和高电压部件产生的磁场、电场通过耦合影响其他部件造成干扰。

在电子设备内，这些电磁干扰都是通过寄生耦合形成的。寄生耦合有电容耦合、电感耦合，这是我们所不希望有的一种客观存在的干扰。

## 2. 按频率范围分类

(1) 工频干扰源 50Hz 及其谐波，波长为 6 000km，包括输配电以及电力牵引系统。

(2) 甚低频干扰源 30kHz 以下，波长大于 10km。

(3) 载频干扰源 10kHz~300kHz，波长大于 1km，包括高压直流输电谐波干扰、交流输电谐波干扰及交流电气铁道的谐波干扰等。

(4) 射频及视频干扰源 300kHz~300MHz，波长在 1~1 000m 之间，包括工业、科学和医用射频设备、输电线电晕放电、高压设备和电力牵引系统的火花放电以及内燃机、电动机、家用电器、照明电器等。

(5) 微波干扰源 300MHz~300GHz，波长在 1mm~1m 之间，包括特高频、超高频、极高频干扰。

(6) 雷电及核电磁脉冲 频谱在 0~1GHz 之间。

## 3. 按产生的原因分类（见表 6-4）

表 6-4 按照产生电磁干扰的原因来分类

大 类 别	产生干扰的原因	小类别及说明
放电噪声	放电产生噪声	火花放电——在电路绝缘破坏的过渡状态下放电 连续放电——电晕放电（部分绝缘破坏） 辉光放电——弧光放电（全电路绝缘破坏） 静电噪声——带静电的火花放电噪声 雷击——雷云和大地之间放电
接触噪声	电流通过接触部分，由接触电阻变化而引起电压变化	静接触噪声——接点接触压力变化，使接触电阻变化而引起干扰 滑动噪声——滑动过程中接触电阻变化而产生的噪声 振动噪声——机械振动使接触电阻变化而产生的噪声 皮膜破坏噪声——接点表面破坏使电阻变化而产生的噪声
	金属的接触面接触不良	接点振动——断开的接点，当接触时由接点跳动而产生的噪声 不完全接触噪声——不完全接触，由接触断续而产生的噪声
	极化电荷波动	电极噪声——医疗电子设备的电极，由于涂料极化引起电压变化而产生的噪声
	金属氧化物整流作用	检波输出信号——由金属和氧化物引起的被调制波的检波作用
	热电动势	直流噪声——由不同金属接点的温差而引起的电动势
过渡现象干扰	过渡现象所产生的电压和电流而引起的干扰	电子开关——硅整流器等产生的噪声 高速数字回路——设备内的电源开关，集成电路的尖峰电流 通电瞬间的冲击电流——白炽灯泡，电动机 电力线路过渡的异常电压——线路开闭和故障时的异常电压 雷电感应——雷云使电线感生电荷，并使放电的自由电荷在电线中形成行波
无用信号的干扰	对电路而言，是毫无用处的信号	市用电源——电源哼声，感应障碍所引起的波形失真 无线电频率干扰——高频设备、发射机、振荡器等 脉冲信号干扰——数字回路、偏转回路等 无用辐射——发射机的高频调制、接收机的局部振荡等
反射干扰	由信号本身反射而引起的干扰	延迟信号干扰——由空间或传输线反射波引起的干扰 不匹配噪声——由于传输线的阻抗不匹配而引起的噪声
等离子	放电等离子区内的离子、电子固有振动	核爆炸噪声，太阳噪声等产生

4. 按传输的状态分类（见表 6-5）

表 6-5 按干扰的传输状态来分类

传输路径	大类别	说 明	小 类 别	
空间	辐射干扰	同波长相比，距离大的场合		
	感应干扰	由近距离电磁场引起，如平行布线、多芯电缆串音等	静电感应——高阻抗场的静电耦合	
			电磁感应——低阻抗场的电磁耦合	
导线	传导干扰	在传播中侵入导线的干扰	按状态分类	差动干扰——往复两导线间所产生的干扰
				同相干扰——导线和大地之间所产生的干扰
			按传输线路不同分类	电源噪声——由电源回路侵入的噪声
				信号输入线——从信号输入线直接侵入
				控制线等——从信号输出线间接侵入
				地线及接地回路——接地点相互之间的电位差

5. 按是否有人为因素分类

根据是否有人为因素，电磁干扰源分为两大类：自然干扰源和人为干扰源。

干扰源的分类方法很多，除了上述分类方法外，从电磁干扰信号的频谱宽度来分，可以分为宽带干扰源和窄带干扰源。它们是相对于指定感受器的带宽大或小来加以区分的。干扰信号的带宽大于指定感受器带宽的称为宽带干扰源，反之称为窄带干扰源。

此外，根据干扰场的性质可分类为电场干扰、磁场干扰和电磁场干扰。根据干扰波形可分类为连续波、周期脉冲波和非周期脉冲波等。

6.2.1.2 自然电磁干扰源

自然干扰源主要来源于大气层的天电噪声、地球外层空间的宇宙噪声、沉积静电噪声以及热噪声。天电噪声、宇宙噪声、沉积静电噪声既是地球电磁环境的基本要素的组成部分，又是对无线电通信、空间技术造成干扰的干扰源。

（1）宇宙噪声包括太空背景噪声、太阳无线电噪声以及月亮、木星和仙后座 A 等发射的无线电噪声 太空背景噪声是由电离层和各种射线组成的。太阳无线电噪声则随着太阳的活动，特别是太阳黑子的发生而显著增加，干扰频率从 10MHz 到几十吉赫。太阳黑子会导致地球表面的磁暴。在磁暴期间，地球不同地点的地电位会出现变化，并且在通信线路中感应电磁噪声。太阳黑子的大量出现还会影响到电离层，从而干扰短波的传播。宇宙干扰在 20~500MHz 频率范围内影响相当明显，使航天飞行器发生一些随机失效和异常现象，还可能造成通信和遥测中断。

（2）大气噪声 主要是由夏季本地雷电和冬季热带地区雷电所产生。地球上平均每秒钟发生 100 次左右的雷击放电，每次雷电都会产生一连串强烈的干扰脉冲，其电磁波借助电离层的传输可传播到很远的地方。例如，距雷暴地区数千千米之外，尽管看不见闪电，但却有严重的电磁辐射。

（3）沉积静电噪声 指大气中的尘埃、雨点、雪花、冰雹等微粒在高速通过飞机、飞船表面时，由于相对摩擦运动而产生电荷迁移从而沉积静电，当电动势升高到 1 000kV 时，就会发生火花放电或电晕放电。这种放电产生的宽带射频噪声频谱分布在几赫兹到几千赫的范围内，严重影响高频、甚高频和超高频频段的无线电通信和导航。

（4）沙暴和尘暴 它是局部的自然干扰源。带电尘粒与导电表面或介质表面交换电荷形成电晕放电。



(5) 热噪声 它是指处于一定热力学状态下的导体中所出现的无规则电起伏, 它是由导体中自由电子的无规则运动引起的, 例如电阻热噪声、气体放电噪声、有源器件的散弹噪声等。

### 6.2.1.3 人为电磁干扰源

人为电磁干扰源是由机电设备或其他人工装置产生的电磁能量干扰, 包括功能性干扰源和非功能性干扰源。功能性干扰源指设备、系统是实现自身功能的过程中产生有用电磁能量而对其他设备、系统造成干扰的用电装置, 如广播、电视、通信、雷达和导航等无线电设备, 又称为有意发射干扰源。非功能性干扰源是指设备、系统是实现自身功能的过程中产生无用电磁能量而对其他设备、系统造成干扰的用电装置, 如交通车辆、架空输电线、照明器具、电动机械、家用电器以及工业、医用射频设备等, 因此, 这部分干扰源又称为无意发射的干扰源。

一般情况下, 人为电磁干扰源比自然电磁干扰源发射的干扰强度大, 对电磁环境的影响更为严重。

#### 1. 无线电发射设备

作为现代文明标志的广播电视、四通八达的通信工具、空中交通管理雷达、远程导航仪器等先进设备, 它们的发射机发射很强的电磁波, 对于相关的接收设备来说, 这些电磁波是传送信息的重要载体, 但是对于其他各种电子仪器和设备来说却是无用而有害的干扰源。

这些发射设备为了保证具有较远的信息传送距离, 往往输出较强的发射功率, 有的已达到 10MW 以上, 短波广播的输出功率为数百千瓦, 1~12 频道的电视台输出功率为 10kW 左右, 而 13 频道以上的发射功率则为 30kW。一台发射机除了发射工作频带内的基波信号外, 还伴随有谐波信号发射和非谐波信号发射, 它们将对有限的频谱资源产生污染。

#### 2. 工业、科学和医用射频设备

工业、科学、医疗等领域的电子设备 (ISM) 是有意产生无线电频率的电磁能量并对其加以利用但却不希望发射的设备。ISM 把 50Hz 交流通过射频振荡变为射频信号, 包括工业加热用的射频振荡器、射频电弧焊、医疗微波设备、超声波发生器、射线机以及家用微波炉等。这些设备通常功率比较大, 虽然没有发射天线, 但由于电磁防护设计简单, 泄漏大量的电磁干扰。

射频加热器主要有感应加热器和介质加热器。感应加热器主要用于锻造、冶炼、淬火、焊接和退火等工艺, 其加工对象是导体或半导体, 工作频率在 1kHz~1MHz 范围内, 应用较多的是数百千赫。

介质加热设备, 例如高频塑料热合机、三夹板干燥机等, 其加工对象是电介质, 工作频率在 13MHz~5.8GHz 范围。它们是窄带电磁干扰源, 但其谐波次数往往可以高达 9 次以上, 在很宽的频率范围内发射强的电磁噪声。

医疗射频设备逐渐成为一个重要的电磁干扰源, 医院内的电磁干扰问题日趋严重。主要的电磁干扰源包括从短波到微波的各种电疗设备、外科用高频手术刀等。

#### 3. 电力、交通、工业设施

高压电力系统包括架空高压送电线路与高压设备, 其电磁干扰源主要来自以下三个方面:

- (1) 导线或其他金属配件表面对空气的电晕放电。
- (2) 绝缘子的非正常放电。
- (3) 不良接触处的火花。

架空输电线的电压范围一般为 3~500kV, 高压输电线路中的绝缘串子、断路器、变压器等高压设备由于表面电场强度过高或存在微小接触间隙造成电晕和火花放电, 放电脉冲具有很宽

的频谱。

电牵引系统包括电气化铁路、轻轨铁道、城市有轨与无轨电车等，它们的共同特点是从线路上获取电流，而不是自身携带电源。直流电气铁道在 20~40kHz 频带内有很大的干扰影响；交流电气铁道在音频时的干扰影响最大。电气铁道中的杂散电流对附近的其他单线回路产生很大的地电流影响，其直流杂散电流常使通信电缆外皮产生腐蚀。电气化火车的牵引车辆和市内电车都有导电弓装置，导电弓跳动和抖动产生随机和周期性的脉冲干扰，一方面脉冲电流沿导线传导进入电网形成干扰，另一方面向空间辐射电磁波。

汽车、摩托车、拖拉机等机动车辆的发动机点火系统是很强的宽带干扰源，在 10~100MHz 频率范围内具有很大的干扰场强，例如马路两旁的居民家中电视机屏幕上经常可以接收到汽车、摩托车驶过的干扰信号。这些车辆产生干扰的最主要原因是电流的突变和电弧现象。点火时产生波形前沿陡峭的火花电流脉冲群和电弧，火花电流峰值可达几千安培，并且具有振荡性质，振荡频率为 20kHz~1MHz，其频谱包括基波及其谐波。汽车等机动车辆中还有发动机风扇、刮水器的电动机等电气设备都会辐射电磁干扰。

工业机器中的各种机床，如车床、铣床、冲床、钻床等，它们的主驱动电动机及其控制调速系统功率较大，启/停频繁，继电器和电机整流子电刷间的开合既向电网中发射传导干扰，同时也向周围空间散发高频辐射干扰。

4. 家用电器、电动工具与照明器具

家用电器、电动工具与照明器具是一批种类繁多、干扰源特性复杂的一大类装置或设备。按其产生电磁干扰的原因，大致可以将这类设备划分如下：

- (1) 由于频繁开关动作而产生的所谓“喀啦声”干扰。这一类设备有电冰箱、洗衣机等。
- (2) 带有换向器的电动机旋转时，由电刷与换向器间的火花形成的电磁干扰源设备，如电钻、电动剃须刀等。
- (3) 可能引起低压电网各项指标下降的干扰源，如空调机、感性负载等。
- (4) 各种气体放电灯，如荧光灯等。

这类电器的功率虽不大，但在启动、转换、停止的瞬间产生电磁干扰。表 6-6 列出了家用吸尘器在工作时输送到电网的传导干扰电压实测值。

表 6-6 家用吸尘器在工作时输送到电网的传导干扰电压

频率 (MHz)	0.15	1.0	5.0	10	20	30
干扰电压 (dBμV)	79.5	61	64	59	63.5	59.0

5. 信息技术设备

信息技术设备的典型代表是传真机、计算机及其外围设备。这类设备内部的干扰源主要有开关电源、时钟振荡器及频率变换器。开关电源与时钟振荡器所产生的电磁干扰主要是它们的基波与谐波等窄带干扰；而脉冲信号（特别是重复频率较低时）则是频谱很宽的宽带干扰源。图 6-17 给出了用电磁干扰接收机测得的某型号计算机的电磁发射值。由图（a）可见，在低频段，开关电源的谐波发射值仍较明显。图（b）表明离开受试计算机 3m 距离上测得的辐射发射已低于 B 级限值。

计算机及其外部设备中的时钟振荡器、开关电源、数字脉冲电路、高速数据总线、频率变换器等都是高频干扰源。计算机输入/输出设备，如绘图仪、磁盘驱动器、键盘按键、CRT 显示器等都会产生电磁干扰，这种干扰信号还可能将计算机正在处理的机要信息泄露出去。

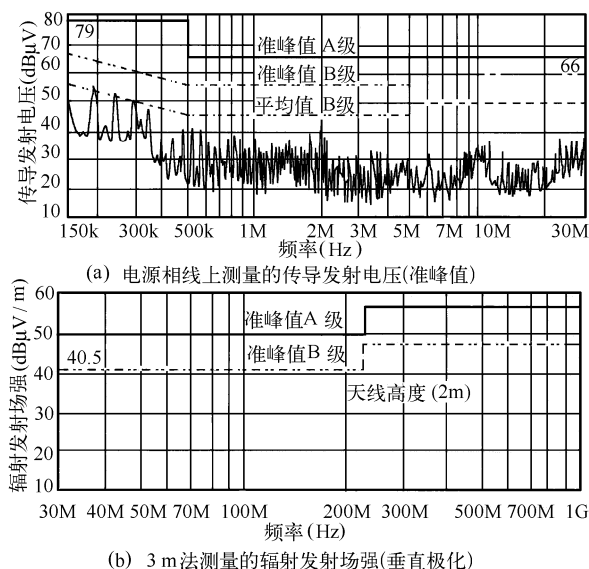


图 6-17 电磁发射值

## 6. 核电磁脉冲

在核爆炸时大家都知道有三大效应：冲击波、热辐射（光辐射）和放射性污染。实际上核武器还有第四效应——电磁脉冲（EMP）。所谓电磁脉冲就是瞬间变化的电场和磁场。形象地说，电磁脉冲犹如雷雨时闪电所产生的电磁信号。核爆炸时产生的强电磁脉冲称为核电磁脉冲（NEMP）。核电磁脉冲的物理成因是核爆炸时释放的  $\gamma$  射线，它以光速与空气分子相碰时，能量很高的  $\gamma$  射线将电子从空气分子中分离出来，并使电子迅速向外扩散。根据相对论中的动量守恒与能量守恒定律，带正电的母体粒子（空气分子）的运动速度较小，运动方向也发生了改变。在物理学中，这种正、负电荷的分离属于康普顿效应。由于这种正、负电荷的分离是大规模发生的，所以在爆心周围形成了一个电离化的区域。这个区域称为源区，在源区内产生的强烈电场称为源场。带负电的电子质量较小，它们以近似光速的速度飞离爆心；而那些失去电子的母体粒子比电子质量大、速度小，因而仍然聚集在爆心周围。正、负电荷的急剧分离，致使爆心处为正电荷，远处为负电荷，所以源场的场强方向由爆心向外。

当核爆炸发生在 3~25km 高度时，由于  $\gamma$  射线在所有方向上都是均匀发射的，因此由电荷分离形成的电场将是径向的。从爆心向外的一切方向上都有着相同的强度。即源区成球对称性，而且由于射线被低空稠密的大气层快速吸收，源区半径只有 2~8km，因而向外，辐射的能量很小。理论上讲，在半径以外的区域，由于对称的相反方向的分量产生的作用完全抵消，这对地面的电子设备没有什么破坏作用。实际上，由于各种情况，会不可避免地出现源区的不对称性，因而还会有一定的康普顿电子从爆心处飞驰，产生一个净电子电流，进而产生磁场，磁场的变化又引起电场的变化。这种电磁场的变化就形成电磁脉冲，会对地面的电子设备产生一定的影响。

核电磁脉冲具有以下几个特点。

（1）幅度大 如果让氢弹在大气层外的高空爆炸，由于没有空气，就不产生冲击波，也不生成热辐射，而放射性尘屑又随距离平方而减弱，再经大气层吸收，所以到达地面时已很微弱，然而在 100km 以上的高空核爆炸时会产生极强的电磁脉冲，其强度可达  $10^5 \text{V/m}$  以上，是无线电电磁场的几百万倍，是大功率雷达波的上千倍。

（2）作用时间短 核电磁脉冲的电场变化迅速，在  $0.01 \sim 0.03 \mu\text{s}$  的时间内即可上升到最大

值, 从发生到结束也只有几十微秒的时间, 比闪电快 50 倍。

(3) 频谱宽 电磁脉冲的频谱很宽, 从几赫到 100MHz, 几乎包含了现代军用电子设备所使用的频段。

(4) 作用范围广 当核爆炸发生在地面或近地面时, 源区与地面接触而呈现明显的不对称形状, 因而形成了较强的辐射电磁场, 大约在 15km 范围内都具有破坏作用, 这个作用距离约等于核爆炸时产生的其他作用的最大距离。当核爆炸在 30km 以上空气稀薄的高空发生时, 由于  $\gamma$  射线衰减较慢, 因而能透过的距离较长, 以致核电磁脉冲的破坏作用可达数千公里, 比光辐射、冲击波和核辐射作用范围大得多。有人估计, 如果在美国内布拉斯加州上空 320km 处爆炸一颗 5 000 万吨级的核弹头, 将产生 50 000V/m 的场强, 辐射出来的电磁脉冲会使全美国变成一片“漆黑”。

#### 6.2.1.4 系统干扰源分析举例

在电子设备防干扰工程的实际应用中, 往往需要针对某个具体的系统进行分析, 以便设计和采取防护措施。例如, 对一辆轿车、一枚运载火箭、一颗人造卫星或者一艘舰船进行系统内、外干扰源的分析, 有针对性地进行防护设计。现在以飞机系统为例来分析可能存在的主要干扰源。

图 6-18 是一架飞机的主要干扰源示意图, 一般将这些干扰源分为系统内干扰源和系统外(或系统间)干扰源两大类。

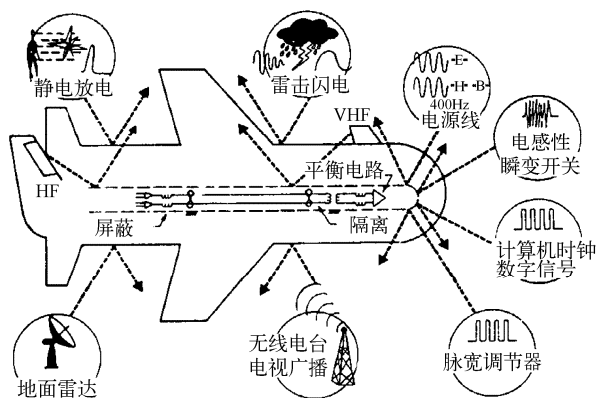


图 6-18 飞机主要干扰源示意图

##### 1. 系统内干扰源

系统内干扰大部分是由机载设备所产生的, 因此又可按机载设备的种类把它们归纳如下:

(1) 无线电发射设备 飞机上的通信、导航、雷达等无线电设备都有大功率的发射机, 它们除了通过天线发射电磁波外, 还通过机壳、电源线、控制线向周围辐射电磁干扰, 在发射信号中除了调谐频率的有用电波外, 还产生谐波和各种调制、交调干扰电磁波, 在它们进行收发工作时, 整个飞机系统内将产生较大的干扰场。

(2) 脉冲数字电路和开关电路 机载计算机中的时钟振荡器以及各种门电路、触发器等都会产生辐射干扰。

(3) 带开关的电感性电气设备 在飞机上存在着许多电感性的电气元件, 如风扇电机、液压电泵、起落架收放驱动电机等, 它们都是含有铁芯线圈的电感性负载, 当开关按钮或继电器触头通/断转换时, 就会在电路中产生前沿很陡的瞬变电压干扰。

(4) 旋转设备和荧光灯 飞机上使用的发电机和电动机在旋转过程中, 由于电刷与整流子(或集电环)之间滑动接触而产生的火花放电能形成频谱很宽的辐射噪声干扰。民航客机的照明大多数采用 400Hz 交流供电的荧光灯, 荧光灯管是充汞、氟混合气体的放电管, 在放电的同时产生高频振荡, 从而形成噪声干扰。

(5) 电源输电线干扰 机舱内空间狭窄, 电缆布置密集, 由于电源线电场和磁场造成的干扰占飞机各种干扰总数的 30%。

## 2. 系统外干扰源

### (1) 静电

飞机上静电来源有几个方面, 主要来自蒙皮和空气中粒子(包括雨、雪、尘埃和发动机排出的废气)相互间的摩擦生电, 使大量电荷积累而产生静电。静电可在飞机的尖端部位形成很高的场强产生电晕放电, 放电噪声会干扰无线电接收机。

飞机上的静电还来源于液压系统中液体的高速流动与管道内壁的摩擦, 以及驾乘人员身体和衣物摩擦产生和携带的静电。此外, 同轴电缆由于弯曲和振动而使聚乙烯等绝缘材料带电也会引起静电。

飞机上的静电放电干扰会造成电子设备的失灵、损坏, 甚至引起燃料和弹药的燃烧和爆炸。

### (2) 雷电干扰

一般雷电都打在飞机的机翼和机身上部。飞机必须事先安排好电流通道, 使之在某一部位的机构上逸出。因此, 飞机活动部位及机内设备都应有良好的搭接防护。

### (3) 宇宙噪声干扰

宇宙空间辐射的干扰噪声对飞机通信导航系统具有明显的影响, 特别是在接收机天线方向图主瓣正对准太阳的情况下干扰更为严重。

### (4) 地面无线电设施的射频干扰

当飞机在机场停留或起飞降落的时候, 航空地面设备和机场设施可能对飞机辐射电磁波构成干扰。此外, 地面广播电视的高频、甚高频发射以及地面高压输电线的电场和瞬态短路引起的电磁发射都是飞机系统外的主要干扰源。

## 6.2.1.5 电磁干扰源的性质

为了分析电磁干扰源产生的干扰效应, 必须确定电磁干扰源发射的电磁能量的空间、时间、频率、强度和形式。通常, 电磁干扰源的性质可由下述参数描述。

### (1) 频谱宽度

电磁干扰按其频谱宽度可以分为窄带干扰和宽带干扰。窄带干扰的带宽一般为几十赫, 最宽也只有几百千赫, 若电磁干扰测量仪调谐正确, 可以认为在其一个调谐位置的测量就包含了全部窄带干扰, 因此只需一个读数。宽带干扰一般是由上升、下降时间都很短的窄脉冲所形成, 脉冲周期越短, 上升时间、下降时间越快, 则脉冲频谱越宽。宽带干扰的带宽可达几十吉赫到几百吉赫, 甚至更宽。宽带干扰测量所得的则是单位带宽内的干扰电平大小。

由于人们对电磁干扰测量仪的带宽概念理解不一致, 因而会出现操作不一致的现象。为了避免因此而引发的问题, 逐渐倾向于取消“宽带”和“窄带”的概念, 而规定固定带宽。

### (2) 波形

电磁干扰有各种不同的波形, 波形是决定电磁干扰频谱宽度的一个重要因素。以脉冲波形为例, 其频谱中的低频含量取决于脉冲波形下的面积, 而高频含量与脉冲前、后沿的陡度

有关,前、后沿越陡,频带宽度就越宽。在所有脉冲波形中,高斯脉冲所占有的频谱最窄,而单位脉冲函数的频谱最宽。因此,从减小干扰的角度考虑,脉冲前、后沿应尽可能具有较小的陡度。

### (3) 幅度或电平

电磁干扰幅度或电平通常用各频段内的干扰功率(或场强)随时间的分布来表示。除了用不同形式的幅度分布(概率,它是指定的幅度值出现的百分率)表示外,还可以用正弦的(具有确定的幅度分布)或随机的概念来说明干扰的性质。因此,规定带宽条件下的发射电平是电磁干扰的重要性质。

### (4) 出现率

电磁干扰功率或场强(电磁干扰能量)随时间的分布与电磁干扰源的工作时间、电磁干扰的出现率有关。按电磁干扰随时间的出现率,可以将其分为三种类型:周期性干扰、非周期性干扰和随机干扰。周期性干扰是指在确定的时间间隔(称为周期)内能重复出现的干扰;非周期性干扰虽然不能在确定的周期内重复出现,但其出现是确定的,而且是可以预测的;随机干扰是不能按预测的方式出现和变化,即它的表现特性是没有规律的,一般采用概率论的统计方法描述它。

周期性干扰、非周期性干扰一般都是功能性的电磁干扰,即为了用于某种特定目的而产生的干扰。例如电源产生的交流声干扰,指令脉冲产生的干扰等。随机干扰可能是设备、系统工作时产生的副产品,或是自然干扰。例如,冲击噪声(由内燃机点火系统、电源线放电、电动机电刷产生的火花等产生)、热噪声、热噪声与冲击噪声的组合。

### (5) 辐射干扰的极化特性

辐射干扰的性质除了可采用频谱宽度、幅度、波形和出现率进行描述外,按其空间传播的特点,还必须引入极化特性、方向特性、天线有效面积等参数。

辐射干扰的极化特性,是指在空间给定点上电磁干扰的电场强度矢量的空间取向随时间变化的特性,它取决于天线的极化特性。当干扰源天线与敏感设备天线极化特性相同时,辐射干扰在敏感设备输入端产生的感应电压最强。

### (6) 辐射干扰的方向特性

辐射干扰源向空间各个方向辐射电磁干扰,或敏感设备接收来自空间各个方向的电磁干扰的能力是不同的,描述这种辐射能力或接收能力的参数称为方向特性。方向特性的量化描述包括方向图、主瓣宽度、副瓣电平、前后比、增益等,其中方向图是指离开电磁干扰源(敏感设备)一定距离处,其辐射(干扰)的相对干扰场强(或功率)随空间方向的变化特性。

### (7) 天线有效面积

天线有效面积是表征敏感设备接收干扰场强能力的参数,它等于传送到匹配负载的平均功率密度与入射到天线上的电磁波平均功率密度之比。显然,天线有效面积越大,敏感设备接收电磁干扰的能力就越强。

## 6.2.2 各种干扰源产生机理

### 6.2.2.1 雷电噪声

雷电包括雷鸣和闪电两种现象。雷鸣是由于空气在温度高达 18 000℃左右时的闪电通道中,因突然而强烈的受热的急速冷却,使空气因急速膨胀和压缩的振动而发生的响声,也是水和空气在高电压(火花)的作用下分解所产生的强大的声响。

根据大量科学测试可知,地球本身就是一个电容器。通常大地稳定地带负电荷 50 万 C 左右,而地球上空存在一个带正电的电离层,这两者之间便形成一个已充电的电容器,它们之间的电压为 300kV 左右,并且场强为上正下负。

当地面含水蒸气的空气受到炽热的地面烘烤受热而上升,或者较温暖的潮湿空气与冷空气相遇而被垫高都会产生向上的气流。这些含水蒸气的上升气流上升时温度逐渐下降形成雨滴、冰雹(称为水成物),这些水成物在地球静电场的作用下被极化(如图 6-19 所示),负电荷在上,正电荷在下,它们在重力作用下落下的速度比云滴和冰晶(这二者称为云粒子)要大,因此极化水成物在下落过程中要与云粒子发

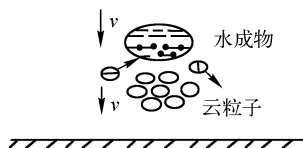


图 6-19 雷云的形成

生碰撞。碰撞的结果是其中一部分云粒子被水成物所捕获,增大了水成物的体积,另一部分未被捕获的被反弹回去。而反弹回去的云粒子带走水成物前端的部分正电荷,使水成物带上负电荷。由于水成物下降的速度快,而云粒子下降的速度慢,因此带正、负两种电荷的微粒逐渐分离(这叫重力分离作用),如果遇到上升气流,云粒子不断上升,分离的作用更加明显。最后形成带正电的云粒子在云的上部,而带负电的水成物在云的下部,或者以雨或雹的形式下降到地面。当上面所讲的带电云层(称为雷云)一经形成,就形成雷云空间电场;雷云空间电场的方向和地面与电离层之间的电场方向都是上正下负,因而加强了大气的电场强度,使大气中水成物的极化更厉害,在上升气流存在的情况下则会使雷云发展得更快。

从上面的分析,好像雷云总是上层带正电荷,下层带负电荷。实际上气流并不单是只有上下移动,而比这种运动更为复杂。因此,雷云电荷的分布也比上面讲的要复杂得多。

人们通常把发生闪电的云称为雷雨云,其实有几种云都与闪电有关,如层积云、雨层云、积云、积雨云,最重要的则是积雨云。云的形成过程是空气中的水汽经由各种原因达到饱和或过饱和状态而发生凝结的过程。使空气中水汽达到饱和是形成云的一个必要条件,其主要方式有:水汽含量不变,空气降温冷却;温度不变,增加水汽含量;既增加水汽含量,又降低温度。

但对云的形成来说,降温过程是最主要的过程。而降温冷却过程中又以上升运动而引起的降温冷却作用最为普遍,积雨云就是一种在强烈垂直对流过程中形成的云。由于地面吸收太阳的辐射热量远大于空气层,所以白天地面温度升高较多,夏日这种升温更为明显,所以近地面的大气的温度由于热传导和热辐射也跟着升高,气体温度升高必然膨胀,密度减小,压强也随着降低,根据力学原理它就要上升,上方的空气层密度相对较大,就要下沉。热气流在上升过程中膨胀降压,同时与高空低温空气进行热交换,于是上升气团中的水汽凝结而出现雾滴,就形成了云。在强对流过程中,云中的雾滴进一步降温,变成过冷水滴、冰晶或雪花,并随高度逐渐增多。在冻结高度( $-10^{\circ}\text{C}$ ),由于过冷水大量冻结而释放潜热,使云顶突然向上发展,达到对流层顶附近后向水平方向铺展,形成云砧。

积雨云形成过程中,在大气电场以及温差起电效应、破碎起电效应的同时作用下,正负电荷分别在云的不同部位积聚。当电荷积聚到一定程度,就会在云与云之间或云与地之间发生放电,也就是人们平常所说的“闪电”。

## 1. 雷

### (1) 直击雷

直击雷其实是大量正负电离子互相中和时的放电现象,当雷云与大地间或雷云相互间的电场强度由于游离电荷的逐渐积累,而增长到足以使空气绝缘破坏的强度时,产生强烈的放电现象,

这是大气放电的表现形式之一。直击雷可以透过云层内部、云块与云块之间、云块与空气、云块与大地的瞬间放电中和形成。当然以破坏性而言，莫过于云块与地上的物体发生放电所造成的毁灭性破坏。

无声放电是大气中放电的另外一种形式，由于暴风雨等原因，大气中的电场强度大大增强，从而引起没有爆炸声的无声放电，实际上就是尖端电晕放电。这种放电现象对通信有干扰作用，对通信设备无损坏的危险。

### (2) 感应雷

直击雷对地放电的通道虽然没有经过被保护物，但放电过程中产生的强大电磁场可以在附近的导体中感应起电磁脉冲，我们称为雷电电磁感应脉冲，即通常所说的感应雷。显然感应雷是由直击雷引起的，所以感应雷又称二次雷。

电子设备中有大量的集成电路通过金属导线相连，机房也通过电力电缆和各种通信传输电缆与外界相连，这就为感应雷的侵入提供了良好的条件，加上现代电子设备采用了大量高集成度的微电子电路，其耐冲击水平较低，容易被感应雷损坏。

感应雷可分为以下两类：

① 静电感应雷。带有大量负电荷的雷云所产生的电场  $E$  将会在架空线路上感生出被电场束缚的正电荷。当雷云对地放电或对云间放电时，云层中的负电荷在一瞬间消失了（严格说是大大减弱），那么在线路上感应出的这些被束缚的正电荷也就在一瞬间失去了束缚；在电势能的作用下，这些正电荷将沿着线路产生大电流冲击，从而对电器设备产生不同程度的影响。

② 电磁感应雷。雷击发生在供电线路附近，或击在避雷针上会产生强大的交变电磁场，此交变电磁场的能量将感应于线路并最终作用到设备上（由于避雷针的存在，建筑物上落雷机会反倒增加，内部设备遭感应雷危害的机会和程度一般来说是增加了），这对用电设备将造成极大危害。

一台电子设备招引感应雷击的通道有 4 条：馈线引入、电源线路引入、信号线路引入和接地线路引入。其中，电源电缆的距离长，对雷电波的传输损耗小，所以由电源侵入的感应雷造成的危害十分突出。

## 2. 闪电

闪电是一种往往长达几千米的巨型电气火花，一般放电时伴有雷鸣。闪电分线状闪电、片状闪电、链状闪电和球形闪电四种。

### (1) 线状闪电

线状闪电是一种蜿蜒曲折、枝叉纵横的巨型电气火花，长数百米到数千米，是闪电中最强烈的一种，大多出现在雷云与大地之间的放电。这种闪电可以同时击落在不同的地方，对通信线路设备威胁最大。

### (2) 片状闪电

片状闪电是一种出现在云的表面上的闪光，这种闪电表示云中电场的能量虽然已经足够产生放电作用，但是新加入的电量太少，致使在闪烁放电尚未转变到线状放电以前就停止了。它有时可能是被云块遮没的火花闪电的回光，也可能是在云的上部出现若隐若现的光。伴随有片状闪电的雷电是比较弱的。

### (3) 链状闪电

链状闪电是一条发光的虚线，像一条链子一样，在云与大地间放电或云与云间放电时均可出现，通常是紧随线状闪电之后在原有链状闪电的地方出现。



#### (4) 球形闪电

球形闪电是个球形发光体,直径为10~20cm。颜色各种各样,最常见的是红、橙、黄三种,存在时间通常小于5s,也有少数超过1min的。在这段时间内,它像一团飘忽不定的火球,基本能维持恒定的大小和亮度。

球状闪电爱钻缝,常从门窗、烟囱,甚至缝隙中钻到房屋内。有时能沿着导线滑行并使之燃烧。球形闪电通常以2m/s的速度水平移动,有时也能停在半空中不动或由云中向地面缓缓降落。有些球形闪电还会从固体(典型的是地面)上反弹回来。

球形闪电移动时也会发出“滋滋”声,消失时常伴随爆炸,并发生巨响,强烈爆炸的功率足以毁坏大烟囱,或劈碎建筑物的一些部分。有时球形闪电也会无声无息地消失。通常在球形闪电消失之后,会留有一股刺鼻的烟味,像臭氧、一氧化氮等的气味。偶而还可观测到一个球形闪电分裂成几个更小的球形闪电的情况。

#### 6.2.2.2 静电噪声

静电是一种电能,它存在于物体表面,是正负电荷失衡时产生的一种现象。静电现象是指电荷在产生与消失过程中所表现出的现象的总称。在一般工业生产中,静电具有高电位、低电量、小电流和作用时间短的特点。静电受环境条件,特别是湿度的影响比较大;静电测量时复现性差、瞬态现象多。

静电同世上任何事物一样具有两重性:既能为人类造福,如静电复印、静电涂敷、静电除尘等静电应用技术;也会带来许多危害,研究发现,摩擦起电、人体静电乃是电子、微电子工业中两大危害源。为使电子器件及产品在购买、入库、发料、检验、储存、调测和安装等过程中免受静电危害,了解静电产生的机理和一些防止静电产生危害的相关知识是非常重要的。

##### 1. 静电的起源

###### (1) 固体起电

① 摩擦起电。两物体在相互接触时,在界面处由于两个作用面能态的差异,如电子功函数、温度、电荷载体浓度等的不同,发生电荷转移而形成偶电层。这种转移可以是电子,也可以是离子。将偶电层简单地看成是一个电容器,两接触面就是电容器的极板。将它们机械分离之后,各自所带电荷符号相反,电量相等,而带电电位相对升高。在分离的瞬间,例如从固体表面剥离薄膜,偶电层发生畸变,而使分离处电场强度剧增,发生了所谓倒流。倒流大小受材料电导率的限制,导体材料的电荷能自由流动,当接触分离时,电荷实际全部中和掉,这就是导体起电很小的原因。

电介质材料显出明显的起电能力。根据物质的起电性能将其排成队,构成静电序列。序列中任意两种物质摩擦,位于前边的物质带正电,位于后面的带负电;相互摩擦的物质在静电序列中位置相距越远,起电后电动势差越大。下面列出一个由常用材料构成的静电序列:玻璃、头发、尼龙、羊毛、绸布、醋酸盐人造丝、滤纸、聚丙烯蜡短纤维(奥纶)、黑橡胶、聚酯纤维(涤纶)、维尼纶、聚乙烯、赛璐珞、玻璃纸、聚氯乙烯、聚四氟乙烯。必须指出,材料起电特性与实验条件有密切关系,不同条件下的静电序列有很大差异。

除了不同的物质间接触摩擦会产生静电外,摩擦起电亦能在相同物质间发生,如高绝缘材料之间摩擦引起很高的静电电位。

② 断裂起电。材料因机械破裂使带电粒子分开，断裂后的两半各带上等量异号电荷。

③ 压电效应起电。某些材料在机械力作用下产生电荷。

④ 热电效应起电。若对显示压电效应的晶体（如电石的晶体）加热，则一端带正电。

⑤ 剥离起电。如图 6-20 所示，当相互密切结合的物体剥离时，会引起电荷的分离，引起分离物体双方带电的现象，称为剥离起电。例如，当把两块密切接触的塑料（如聚乙烯袋）分开时，能产生 10kV 以上的静电。剥离带电根据不同的接触面积、接触面的黏着力和剥离速度而产生不同的静电量。

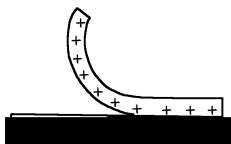


图 6-20 剥离起电

⑥ 电解起电。固体与液体（电解质溶液）接触时，固体离子将向溶液扩散，在固体和电解质溶液的界面上将有电流流过。随着这一过程的进行，界面上出现偶电层，形成电位差。无水酸同金属接触时带负电；无水碱同金属接触时带正电；强酸性材料容易带负电；强碱性材料容易带正电。

固体与固体接触时，由于固体表面能吸附很薄的水膜或其他液体膜，因而在固体与固体相接触的间隙之间，也有这样的薄膜，并在这里发生电解现象。由于液体薄膜大大降低了固体的表面电阻率，以致使固体接触分离时，界面两侧的电荷几乎全部泄漏而不带电。

### （2）粉体起电

粉体起电是由于粉体与器壁、粉体与粉体间相互碰撞、接触分离、摩擦、碎裂而引起的。这时起电量与其分散度、电导率、壁面电导率、速度、周围空气湿度、相互作用的强烈程度、碰撞时的接触程度及接触面积等有关。颗粒越小、相互作用越强烈、碰撞面积越大，起电就愈强。

### （3）液体起电

液相（如石油）与固相（如金属）界面亦能形成偶电层，因为任一种液体电介质（如石油等烃类液体），不论其电导率多低，纯度多高，其内部总会含有少量的可电离的杂质。当液体处于静态时，这种杂质和其他离子被吸引到金属壁面上，这种吸引力与带电粒子类型、管道半径等诸多因素有关。正、负离子对金属不可能具有相同的亲和力，亲和力大的就被金属表面所吸引并附着，而液体中电荷量相等的异号离子将被留在液相内，并聚集在界面附近，这样在界面处形成了偶电层，内层是紧贴在固体表面的离子，称固定层或吸附层，而外层离子是可动的称活动层或扩散层。

当液体流动时，流动层的带电粒子随液体流动形成了流动电流；异号带电粒子留在管道中，如果管道接地则流入大地，这样就发生电荷分离，随液体流动的电荷所形成之电流称为流动电流。当液体处于稳态时，液相中的带电粒子不断地被流动液体带走，固定层电荷经接地管道而被中和，重新又从液体中出现等量的正负电荷层而重复上述过程，此种现象有点类似电解，不同的是亲和力、扩散与液体流动的综合作用取代了解析中的电场作用。影响液体带电量的大小和极性的因素有：液体的种类和特性；管道材料及其表面光滑程度；流速、温度、含水量和空气和混合物以及杂质微粒等。

喷射在空间的液体类物质由于扩展分散和分离，使之形成许多微小液雾和微粒，当与喷嘴接触分离时使微粒与喷嘴带有电荷。当液体微粒喷出时又与空气接触分裂成更小的液滴，大的沉降，小的成为电荷云。

## 2. 静电放电效应

当天气干燥、用塑料梳子梳头时会产生放电声；和毛皮摩擦之后的钢笔杆可吸引小纸屑；脱下合成纤维衣服时产生噼啪声，夜间还可以看到火花（空气的击穿场强为 30kV/cm）；在日光灯、电视机屏幕、唱片、录音机磁头上易于附着灰尘等现象，这都是日常生活中经常体验到

的静电现象。

当某些电介质、导体带上静电荷后,尽管所带电荷量不大,但由于自身对大地分布电容非常小,使得静电电位较高。当垂直于带电物体表面的静电场梯度较大时,可发生静电放电。在放电的同时,由于放电通道有电子电流流动,会产生焦耳热和声响,同时还产生宽带电磁辐射。静电放电可以出现在两个静电电位不同的物体之间,也可发生在物体表面静电荷直接向空气放电。

### 3. 人体静电

飞机、车辆、用电设备以及人体都会积累电荷成为带电体。在工业生产中,作为操作者的人体是最主要的静电发生源之一,人体静电是导致元器件击穿损坏和对电子设备运行产生干扰的主要原因。

(1) 人体静电的产生 主要由人的行动,包括人体与衣服、鞋袜等其他物体摩擦、接触、分离或直接触及静电而产生。此外还有其他方式,例如:

① 感应起电。人靠近带电体,受电场作用,产生感应电荷。如在荧光屏前的人面部会有感应负电荷,虽然此时人体净电荷可能为零,但对地电压不是零。这种感应电压有时很高,例如,在雷雨云下行走,感应电压可达5万伏。

② 吸附起电。人处于一个漂浮带电灰尘或雾霭的环境里,这些微小带电体在人体表感应出异号电荷并受库仑力作用飘向人体,最终把电荷传给人。近年来,随着人民生活水平的提高,家庭装修中广泛使用地毯、壁纸、涂料等绝缘材料。它们在给人带来舒适和美感的同时,也让我们时刻处于复杂的静电环境中。

(2) 影响人体带电的因素 主要有下面几种。

① 人体对地电阻。主要由鞋和地面的电阻组成。人体对地电阻通常通过测量可以确定,并能人为控制。要想使人体静电电位值降低,主要是通过降低人体对地电阻来实现。

② 不同布料制成的服装和湿度关系。化纤类服装由于具有较高的绝缘电阻,且吸湿性较差,因而当由于某种原因产生静电时,其幅值相对较高。棉布虽然绝缘电阻较高,但吸湿性强。当受到湿空气影响时,绝缘强度降低,故产生的静电幅值较低。

③ 人体电容。指人体对大地的电容,它包括人体和导电地面以及人对周围导体间的电容。人体对大地电容是变化的。在实际工作中,通过某些辅助措施增大人体对地电容以达到降低人体静电电位的方法,具有一定的应用价值。

通常人体带电量为  $0.5 \sim 5 \mu\text{C}$ , 人体对地电容约为  $100 \sim 450 \text{pF}$ , 静电场足以使人体充电到很高的电位。若假设人体对地电容取  $C = 150 \text{pF}$ , 人体带电量  $Q = 3 \mu\text{C}$ , 按  $U = Q/C$  可以计算得人体对地电压  $U = 20\,000 \text{V}$ 。

④ 活动速率。人的活动速率越大,起电率就越大。这是由于接触频率高、分离速度快、电荷反流少的原因。例如在相同温度下,人穿塑料拖鞋在化纤地毯上行走,快走可起电  $3000 \text{V}$  以上,而慢行仅有几百伏。

带有上述静电高压的人员触及电子计算机或其他电子设备的键盘或各种控制旋钮时,就会发生放电现象,如图 6-21 所示。放电火花产生的电磁干扰有可能使计算机程序出错或丢失数据、测量和控制系统失灵或发生故障。

### 4. 装配工序中的静电源

(1) 在电子设备装配生产过程中的很多操作都可以产生静电 简要介绍如下:

① 工作服。普通工作服(化纤和纯棉制)与工作

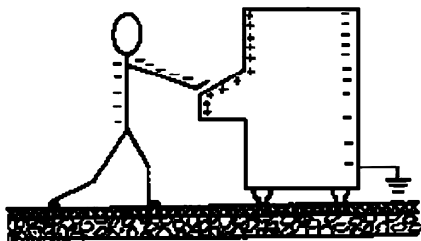


图 6-21 静电放电

台面、工作椅摩擦时,在服装表面能产生 6 000V 以上的静电电压并使人体带电。当作业人员手持集成电路芯片或工作服与放置在工作台面上的元器件接触时,即可导致放电。因元器件各引出线接触电位不同和芯片电介质极薄、绝缘强度很低等原因,很容易造成器件电介质的击穿。

② 工作鞋。工作鞋(橡胶或塑料鞋底)与地面摩擦时产生静电荷使人体和所穿服装带静电。工作鞋与地面摩擦所产生静电导致元器件失效的事例并不多,但因其较高的绝缘电阻,使人体所带静电不能很快泄漏从而对元器件的生产带来不良影响。

③ 树脂、浸漆封装表面。许多电子元器件需要用高绝缘树脂、漆封装表面。这些器件包装后,因运输过程的摩擦,在其表面能产生几百伏以上的静电电压,易造成器件芯片击穿。

④ 各种包装和容器。用 PE(聚乙烯)、PP(聚丙烯)、PS(聚苯乙烯)、PUR(聚氨酯)、ABS 等高分子材料制备的包装和元件盒(箱)都可因摩擦、冲击产生静电荷对所包装器件产生不良影响。

⑤ 工作台。工作台表面受到摩擦产生静电,可对放置其上的电子元器件放电。

⑥ 各种绝缘地面。混凝土、打蜡抛光地板、橡胶板等都可因摩擦产生静电。另外因其较高的绝缘电阻,在其上的作业人员所带静电短时间内不会泄放。

⑦ 温箱。温箱内热循环空气流动与箱体摩擦产生大量静电荷,对器件热烘处理非常不利。

⑧ 空气压缩机。利用空气压缩机进行喷雾、清洗、油漆、喷砂等作业的设备都可因空气剧烈流动或介质与喷嘴摩擦产生大量静电荷,当电子器件接触到带电介质时可造成损坏。

⑨ 某些电子生产设备。电烙铁、波峰焊机等元器件装配设备,其内设的高压变压器、交直流电路等都可可在设备等上感应出静电电压,如果不采取静电泄漏措施,则可使元器件在装配过程中失效。

(2) 为防止上述静电危害而采取的措施

① 采用导电纤维编织的地毯或专用的计算机房抗静电地板。

② 操作人员穿着防静电的工作服和工作鞋,并戴上接地的导电手镯。

③ 把空气相对湿度增加到 60%~70%,借助加大潮气的含量来增加诸如纤维、混凝土之类绝缘材料的电导率。

④ 把系统或设备内所有金属构件用导电条连接起来,以消除在该系统中的任何两个金属物体之间由静电感应而引起的电位差。

### 6.2.2.3 放电噪声

#### 1. 气体放电

在一个大气压下,取曲率半径较小的电极,在电极间加以电压并慢慢升高。虽然起初几乎并无电流通过,但一旦电极尖端出现局部绝缘破坏,电流则会急剧增加,进而形成电晕,最后由火花放电到弧光放电。放电的模样随着两电极曲率半径的大小而稍有不同,当电极的曲率半径取得大时,可不经电晕放电而直接形成火花放电。接点开闭时所产生的噪声来自于火花放电或弧光放电,这取决于回路条件。辉光放电产生于低气压状态,因此称为真空放电。

#### 2. 电晕噪声

电晕是一种放电现象。在大气压或高于大气压的条件下,在一条极细的电极丝与金属物体之间加上交流电压,当电极丝与金属物体之间的电场强度达到一定值时,其间的部分空气会被电离,交替地产生带正、负电的离子。在电场力作用下,电离子开始作定向加速运动,并与空气分子撞击,又产生新的离子,如此反复,其间的空气完全电离,并产生发光的电晕层。

在交流电压的情况下,按每半周期交替地出现正电晕和负电晕。所谓正电晕是在正半波产生的电晕,所谓负电晕是在负半波产生的电晕。新的和干燥的导体,只在导体上电压为负半周时出现电晕噪声,暴露在风雨中的导体,则正负半周均产生噪声。但当导体处于潮湿状态,主要在正半周出现电晕噪声,而且噪声电平比干燥导体大几倍之多。电机耐压实验中产生的实际电晕放电信号如图 6-22 所示。

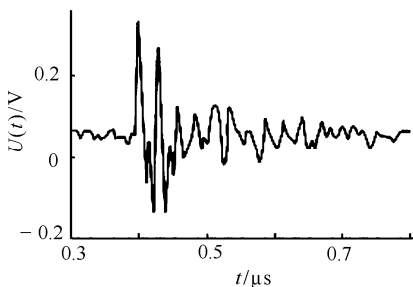


图 6-22 电机电晕放电信号

电晕放电产生干扰主要是断续的脉冲电流引起的,也可视为是高频振动的干扰。输电线的电晕噪声是通过输电线的任一处,以每秒几万次的电晕脉冲而产生的高频噪声。输电线的正电晕是从电线中迸发出来,在尖端分成多束,发出强光放电。输电线的负电晕是发出淡光,比较稳定地进行连续弱光放电。

在数兆赫以上的频率点,电晕噪声电平显著降低。因此,由输电线而产生的电晕噪声,真正对电波有影响的主要还是在无线电接收机的中波段(540~1600kHz);而对电视发送(90~222MHz, 470~770MHz)和甚低频(76~90MHz)而言,几乎不存在任何问题。比如无线电中波广播,在城市近郊处于广播电台电波强的地方,则可获得足够的信噪比,而不怕电磁干扰。但对电场弱的地方,则相对有较大的干扰。

100kV 以下的输电线所产生的电晕放电,几乎对周围不起什么作用,但从绝缘子所产生的噪声,对电源却形成干扰。实际上除绝缘子本身过脏和破坏外,一般很少由噪声而造成事故。

### 3. 火花放电

由火花放电所产生的噪声干扰,包括以自然空间放电现象、有电设备、电气铁道和汽车电动机的点火装置等,其种类非常之多,约占放电噪声的大部分。在结构上不论采取何种形式的接点,总是难免要出现电流的断和续,由此而产生的火花放电,就形成了噪声的根源。

### 4. 弧光放电

接点之间随着压力的减小,而将要脱开时,从微观的观点来看,由于产生焦耳热,在非常窄的电极之间,产生十分浓密的金属蒸气,使电极表面处于接近沸点的加热温度,因此,当接点两端加有足够高的电压时,即可产生弧光。这个接点间的蒸气将冷却或扩散,当浓度下降时弧光消失。

弧光放电出现于火花放电之后,为了达到使弧光放电处于起始状态,必须在电压回路中加有高于最小弧光的电压,在电流回路中加有大于最小弧光的电流。

弧光放电的电压、电流特性表现出负特性,随着弧光长度的缩短,电压也相应降低,因此特性接近于水平。当弧光长度几乎等于零时,一般称这时的弧光放电为最短弧光特性。电源电压尽管在最小弧光电压值以下,但接点回路中若带有电感量,则由于脱开时的反向电动势,也会出现超过最小弧光电压而开始弧光放电。

为使接点噪声尽量减小,当选择接点材料和决定其使用条件时,需注意如下事项。

- (1) 选择接触电阻低的材料。
- (2) 保证接点接触良好,可根据接点材料而适当地加接点预压力。
- (3) 选择熔点和沸点高的材料。
- (4) 接点的使用电流要小于允许电流。

### 5. 整流子电动机的噪声

整流子电动机所产生的噪声,一种是由电刷和整流子之间滑动接触而引起的,另一种是电刷在脱离整流子片时,由整流火花而产生的,后者噪声大。当电刷通过相邻的整流子片时,整流子片被短路,在连接的电机绕组上流过短路电流,待电刷滑向下一个整流子片时,由于处于瞬时开路状态,因此产生火花。这个过程反复进行,在很宽的频带内引起干扰。不带整流子片的电动机,为了从转子中取出电流,也可采用集电环和电刷,转动中的接触状态总会有变化,因此,两者之间也产生火花,只是噪声小些而已。

### 6. 电气铁路的噪声

电力机车在运行中产生噪声的部位有如下几处:

- (1) 导电弓架从滑接线脱开(脱线)处。
- (2) 车轮和轨道之间。
- (3) 电动机整流子和电刷之间。
- (4) 电磁阀、电磁接触器、大继电器、电抗器负载的开闭处。
- (5) 真空开关(交流电气铁路)。

关于(1)和(2)两项,多数是随接点而移动,尽管接触压力的变化也会产生干扰电压,但还是火花放电引起的干扰为多,由火花放电过渡到弧光放电,实际电车线成为一个辐射体对外释放干扰。由上述(1)的导电弓架脱线所引起的噪声最大。弓架脱线所产生的噪声,包括由导电弓架跳动而引起的脉冲噪声,以及由导电弓架的滑动产生的连续噪声;当然脉冲噪声的电平比较高。

电磁阀在切断电路时将产生很大的冲击。水银接点继电器的切断性能好,弧光时间短,因此产生的冲击电压也大,往往是反复地切断再燃弧,而且每次切断的再燃弧电压都比冲击电压高,切断期间产生 1.5kV 以上的大冲击。

交流回路中的真空开关也是大冲击电压的发生源。通常交流开关都在零电流时进行切断,而真空开关都是在尚未消弧之前切断电流,因此产生很大的冲击电压。不仅是在切断时有冲击产生,而且在接通时也有很大的冲击电压产生,冲击电压可高达回路电压的 2~3 倍。

降低冲击电压的措施,是在变压器次级加 RC 滤波回路,以加强平滑冲击的作用;另外,在变压器初级线圈和次级线圈之间加入静电屏蔽,以防止冲击电压通过静电过渡到次级。

### 7. 金属化纸电容的噪声

电容器的绝缘破坏也会引起内部放电而形成噪声源。尤其是金属化纸电容,在气孔处由于放电电极被烧伤,虽然电容本身有恢复能力,但因处于放电,在恢复的瞬间实际也形成了噪声源。因此,易受脉冲噪声影响的数字回路,不宜使用这种电容器。

### 8. 荧光灯噪声

荧光灯是在放电管中封入水银和氩混合气体,随着放电产生高频振动而形成噪声干扰源。其中,阳极振动是由于阳极电压的电场作用而产生间歇电离,使回路形成基本频率为数千赫兹的弛张振动。

利用交流电点燃荧光灯时,在半周期的起始点和终止点所产生的放电电流趋向于减小的状态。当这个电流比热阴极加温饱和电流小时,在阴极前面则产生空间电荷,随着带电粒子的增减,产生离子壳和等离子界面,带电粒子于是处于不规则的过渡状态,不可避免要产生不连续的电子和离子流,从而造成散乱噪声。

#### 6.2.2.4 接触噪声

##### 1. 不完全接触噪声

不完全接触噪声是由于接触部分接触不良而引起的噪声,这种噪声电压与接触电阻的变化和电流成比例关系。在严重断路的情况下,这种噪声很容易被发现,多出于接触不良。因此,消除措施采取通以大电流,也可利用测试器进行电冲击。

如果端子采用高密度或小型结构,接触压力就不得不减小,电极表面薄膜不易产生机械性破坏,但在小电流和低电压情况下易受干扰。一般是电流越小,接触电阻值的变化就越大,接触电阻几乎与电流成反比。低电平回路阻抗一般比较高,因此接触电阻高一些问题不大,但是接触电阻总是不稳定的,因此易产生噪声。

在焊点内部,因导线生锈而引起焊接不良,开始问题尚不明显,但待半年或一年后将会出现噪声或接触不良现象。尤其在调整或修理中进行重焊时,更容易产生焊接不良现象。

接地连接板的接触不良和导线切割状态也需注意。当接地连接板生锈而接触电阻增大时,即使有像灯丝电流那样大的干扰电流通过,在接触处也将产生相当大的电压降,此电压降如果进入放大器的输入回路,则会造成相当大的噪声输出。

电容器的引出线同内电极只是机械的接触,如果接触不良,则产生吱吱的噪声,如果很严重,电极和引出线之间则流入被熔化的石蜡,俗称电容器漏电。

##### 2. 振动噪声

振动噪声一般是指当接点接触时由于振动,接触电阻变化而产生的噪声,同时伴随着放电噪声。继电器的接点其接触是比较好的,静止的接点可认为不产生噪声,但如果有机机械振动,也会产生噪声。

##### 3. 滑动噪声

由于接触面的滑动而引起接触电阻变化所产生的噪声,如可变电阻器往复滑动以及电动机旋转运动而产生的噪声。不带整流子的电动机所产生的噪声,主要也是由滑动引起的,只不过噪声电平比火花噪声小。

可变电阻器的滑动噪声是指旋转可变电阻器时所产生的噪声。在任何情况下,只要电流通过电阻体就会增加噪声。因此,设计回路时,要防止无用电流通过可变电阻器,例如要防止偏压回路的电流流过。

产生滑动噪声的原因,多是由于表面的化学变化和滑动引起的物理变化所致。但从所产生的噪声来分析,就金属类而言,当使用可变电阻器时,由于在滑动部分产生摩擦高温,使金属表面出现部分熔融的凹凸状态,待触头在表面滑动时,由于接触电阻不规则的变化,因此产生滑动噪声。对化学变化而言,主要是由于接触表面的氧化,以及由于湿度而引起的腐蚀,使接触电阻产生局部的变化。如木制机壳的黏结剂,当其中含有甲醛成分时,一旦湿度升高,在金属的接触部分易引起化学变化。

##### 4. 电极噪声

医疗电子设备为了从人体中取出生物电信号,首先要通过接触电极,这种电极用金属制成板状,借助胶体敷在人体的皮肤上,触头是针状并用绝缘物包覆,仅针的尖端从绝缘物露出,将针刺入体内而取出生物信号。这时所产生的极化电压将叠加在信号上而生成噪声。极化电压的大小,随着电极材料、表面沾污程度和胶体种类以及涂覆肢体的时间不同而不同。一般是几十毫伏,条件好时约几毫伏,条件不好有时可达几百毫伏,因此要有很大的极化噪声电压叠加在信号上。除

电化学波动外，还有生物体及电极在生物体上移动所造成的波动。

#### 5. 由热电动势产生的直流干扰

在直流放大器中，由低电平输入回路所产生的热电动势，也是形成噪声的根源。为了防止热电动势产生直流电压，应注意采取如下措施：

- (1) 低电平信号部分的配线要短，接点之间的温差要极小。
- (2) 尽量避免使用铜以外的金属，必要时可采用产生热电动势小的金属组合。
- (3) 两导线的接触部分要求结合完好，并注意采用低热电动势焊接（Cd70%，Sn30%）覆盖。

### 6.2.2.5 反射干扰

无噪声信号本身有时也会产生干扰，主要是由于完全相同的信号或正负相位反向的两个信号，比原有的信号延迟到达而产生的。人的耳朵不能辨别声音的相位，所以声音信号对听觉妨碍不大，但对图像信号和数字信号，则会产生很多问题，如电视接收机图像重影等。

当传输线存在阻抗不匹配时，除产生反射而出现延迟信号外，还由于反射信号的复杂组合而产生波形失真。同时由于不匹配，其中也包含有振荡成分和无用脉冲。

#### 1. 金属体的电磁波反射

金属板、金属网屏蔽多数是靠金属表面的反射损失而达到屏蔽效果的。如具有数十分贝的屏蔽效果，入射进来的电磁波大部分都由于反射效应而衰减掉。反射的电磁波强度，同金属体的面积直接相关。屏蔽媒介除钢筋水泥建筑物等静止物体外，还有像电车、汽车和飞机等运动物体。

钢筋水泥建筑中的钢筋就是属于金属网反射电磁波的一种，高层建筑对电波干扰已成为普遍性问题。为了减小建筑物反射的影响，将钢筋水泥建筑的表面设计成非平面形状，如设计成凹形表面，会有很大的改善。

#### 2. 传输线上的反射

在传输线路上，阻抗不匹配也会引起反射。电视接收机不仅受到建筑物反射的影响，同时，从天线到接收机入口的电缆内所产生的反射对它也有影响，在电视机内也产生重影。

在传输线路上如出现两处阻抗不匹配，就会使电波反复进行反射，反射波的合成则形成波形失真，这就如同噪声的作用。在同轴线或对称双线的线路中，当发送端和接收端的阻抗不匹配时，发送端和接收端的波形也相应有变化。

### 6.2.2.6 过渡干扰

#### 1. 电子开关

电子开关的开闭引起电流急剧变化也是产生干扰的原因。如果开关控制的回路中有振荡回路，而回路的衰减电阻又很小，那么开关的开闭无疑将产生衰减振荡。有的回路虽未直接接入振荡回路，但由于开关的开闭，在回路中总要产生冲击电压，这种冲击脉冲如果进入接收机，则输入回路及后段的谐振回路，很容易产生相应的固有振荡而形成干扰。

#### 2. 开闭电源的冲击电流

在正常状态下本来不成其干扰源的，在过渡状态下由于电平急剧增大，往往也会形成干扰。电源接入时的冲击电流，就是典型例子，设备中所流过的电流将达到正常状态下的数倍以上。

白炽灯泡是对钨丝进行加热而使其发光。但钨丝的电阻是随着温度的升高而增大，在发光状态下的电阻要比常温下大得多。因此，对室温状态下的灯丝，通以电源时，由于这时灯丝的电阻比工作状态时小，自然在接通电源时要产生冲击电流。



指示灯的冲击电流,要比平常点灯中的电流大 6 倍之多,甚至也有达 10 倍以上的。防止指示灯冲击电流干扰的措施之一,如图 6-23 所示,在开关上并联电阻。开关虽处于断开状态,但灯丝仍能流过某种程度的电流,即可避免温度的急剧变化。发光二极管不能承受冲击电流,因此最好采用这种防护措施。

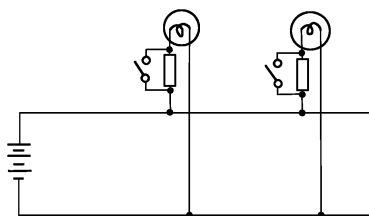


图 6-23 指示灯回路

电动机在接入电源时能形成大的冲击电流,小型电动机的冲击电流是稳定电流的 6 倍之多,因此在系统内有小型电动机反复启动和停止时,将产生干扰。

### 6.2.2.7 无用信号

回路中不属正常工作所用的信号就是无用信号,无用信号同噪声无本质区别。大功率输电线是工频干扰的噪声源,而小功率输电线,尽管是低电平信号线,当近距离平行走线时,市电频率也有干扰。例如在电子仪器内部,由于市电频率的感应往往产生交流哼声。

发射机向空间发射电波,这一电波除被接收对象接收外,当然对其他电子装置也要形成干扰。采用超外差方式的接收机,因局部振荡的泄漏,很容易形成干扰。例如电视接收机的局部振荡频率,就可直接向空间发射,有时会形成对高频回路进行逆流,泄漏出的信号同馈线相耦合再通过天线发射,从而对附近的接收机形成干扰。

## 6.2.3 电磁干扰源的危害

如前所述,电子设备或系统在正常使用过程中往往会产生一些有用或无用的电磁能量,作为发射源影响其他设备、系统和生物体,导致电磁环境日趋复杂,造成空间电磁波污染。总的说来,电磁辐射能量对人类活动有三大危害。

(1) 电磁干扰会破坏或降低电子设备的工作性能。

(2) 电磁干扰能量可能引起易燃、易爆物的起火和爆炸,造成武器装备的失灵、储油罐起火爆炸,带来巨大经济损失和人身伤亡。

(3) 电磁干扰能量可对人体组织器官造成伤害,危及人类的身体健康。

现就几个领域的电磁干扰现象作简要介绍。

### 6.2.3.1 对燃油的危害

(1) 各种燃料油在强电磁场作用下有发生燃烧和爆炸的危险。常见事故有以下三种情形。

① 直接照射。实验表明,燃油蒸气在 2~13MHz 范围内发射天线辐射的电磁波照射下,如果发射功率为 100W,天线与燃油距离为 11.5~75m 之间,就会发生自燃而引起爆炸。

② 电火花点燃。在大功率发射天线附近给飞机加油时,在特定条件下当油枪嘴从飞机油箱中抽出来的瞬间会引起爆炸。这是因为油枪、接地电缆和飞机构架组成了一个射频接收回路,接收到的电磁场能量使油枪和飞机油箱之间产生高达 150V 的电位差,形成约 0.12A 的电流,油枪嘴离开油箱时引起电弧放电,电火花使燃油燃烧起爆。

③ 静电放电。当易挥发的燃油装在密封的油罐车中运输时,燃油在车罐内晃动、摩擦会产生静电放电。当挥发的油蒸气和空气的混合物比例合适时就会起火爆炸。

(2) 以上三种使燃油引燃起爆的情况须具备三个条件

- ① 在一个给定的环境温度中, 燃料蒸气和空气混合比例必须恰当。
- ② 在电弧和火花中必须具有足够的能量, 为点燃提供适当的温度。
- ③ 为了维护电弧中的热量, 电弧间隙必须有足够的长度, 以便产生点燃温度。

由此可见, 燃油的点燃主要取决于电磁能量, 当然也和诸如温度、压力、蒸汽混合物的成分等其他条件有关。虽然以上三个条件同时存在使燃料意外点燃的可能性很小, 但一旦发生燃爆, 所带来的生命财产的损失是巨大的。

### 6.2.3.2 对飞行器的危害

介绍几个国外航天系统的故障事例。

#### (1) 民兵 I 导弹飞行故障

1962 年, 民兵 I 导弹开始进行飞行试验。前两次均遭到失败, 而且故障现象相似, 都是在 I 级发动机关机前炸毁。炸毁时的高度一个为 7.6km, 另一个为 21.8km。在炸毁前, 两发导弹的制导计算机均受到脉冲干扰而失灵。经过分析, 导弹飞行到一定高度时, 在相互绝缘的弹头结构与弹体结构之间出现了静电放电, 它产生的干扰脉冲破坏了计算机的正常工作而造成此次故障。

飞机在空中高速飞行时, 灰尘、沙粒、雨点、雪花等质点撞击飞机表面, 且使其带电, 通常飞机对地电压可达十几千伏。因此飞机在降落到地面时必须通过接地装置将它携带的静电电荷释放掉。

#### (2) 侦察兵火箭飞行故障

1964 年, 某国的侦察兵火箭发射后飞行正常, 但在 2 级发动机点火后不久即炸毁。初步分析认为, 由于指令自毁电路级间连线与 2 级点火电路共用同一分离插头, 点火电路及指令自毁电路是由同一电池供电, 而且是共用负母线。当气压降低到一定值时, 在级间分离插头的点火电路接点与自毁电路接点之间出现电弧放电, 而且在热分离时, 在插头护盖盖好之前, 发动机火焰等离子体使电弧大为加速。这样形成的低电阻电离通道使 2 级自毁系统引爆而失败。

#### (3) 德尔他火箭事故

1964 年, 在某发射场, 德尔他运载火箭的 3 级发动机发生意外点火事故, 造成三人死亡。在塔尔萨城对德尔他火箭进行测试时, 也发生过一起 3 级发动机意外点火事故。分析结果表明, 在某发射场的事故是由于操作罩在第三级轨道观测卫星上的聚乙烯罩衣时, 造成静电荷的重新分布, 结果使漏电流经过发动机的一个零件到达点火电爆管的壳体而引起误爆。在塔尔萨城发生的事故是由于一个技术员戴着皮手套偶然摩擦发动机喷管的塑料隔板, 使发动机点火电爆管引线上感应静电荷而引起。

#### (4) 大力神 C 运载火箭故障

1967 年, 大力神 C 运载火箭的 C-10 火箭在起飞后 95s, 飞行高度 26km 时, 制导计算机发生故障。C-14 火箭起飞后 76s, 飞行高度为 17km 时, 制导计算机也发生了故障。两次均把卫星送到了错误的运行轨道, 损失高达 30 亿美元。经过分析, 故障原因是制导计算机采用了液体循环冷却方案, 冷却液在外部带有钢丝编织网套的聚四氟乙烯软管内流动。此钢丝套软管是用经阳极化处理的铝支架分段固定的, 由于金属网套的不少处因支架阳极化氧化层破裂而接地。但有几段未接地, 当冷却液流动时, 金属网套没有接地的部分与火箭地之间产生电压, 当火箭飞行高度增加, 气压下降到一定值时, 此电压产生的火花放电使计算机发生了故障。

#### (5) 土星-阿波罗 12 事件

1969 年 11 月 14 日上午, 土星-阿波罗 12 火箭及载人飞船发射后, 飞行正常。起飞后 36.5s,

飞行高度为 1 920m 时, 火箭遭到雷击。起飞后 52s, 飞行高度为 4 300m 时, 火箭又遭到第二次雷击。这便是轰动一时的大型运载火箭-载人飞船在飞行中诱发雷击的事件。

调查结果表明, 此次事故是由于火箭及其火箭发动机火焰所形成的导体(火箭与飞船共长 100m, 火焰折合导电长度约 200m)在飞行中使云层至地面之间及云层至云层之间人为地诱发了雷电所造成的。

#### (6) 欧罗巴火箭故障

1971 年 11 月 5 日, 第一发欧罗巴火箭起飞后 105s, 高度约 27km, 制导计算机发生故障, 姿态失控。约 1min 后, 火箭炸毁。调查结果表明, 火箭在主动段飞行中产生了静电荷, 这些电荷逐渐积累并储存于介质材料的表面。由于气动加热, 介质材料温度升高, 其电阻值相应减小。对于静电而言, 介质材料便从绝缘体变为导体。这样, 部分电荷便转移到相邻未接地的金属体上。当飞行高度增加、气压下降到一定值时, 即发生静电放电而引起计算机故障, 从而导致飞行失败。

#### (7) 宇宙神导弹爆炸事件

1987 年 3 月 25 日, 美国用宇宙神——人马座运载火箭发射海军的舰队通信卫星时, 起飞 48~53s 期间, 运载火箭的一台计算机错误地向主发动机发出“偏转”指令, 致使火箭翻滚, 地面人员只好发出指令炸毁。事故是因为接地汇流条与连接面之间连接件紧固不够而产生锈蚀, 此锈蚀表面形成了非线性整流结(锈螺栓效应), 从而使指令接收机收到虚假指令信号。

#### (8) 飞机导航系统的故障

美国航空无线电委员会(RTCA)曾在一份文件中提到, 由于没有采取对电磁干扰的防护措施, 一位旅客在飞机上使用调频收音机, 使导航系统的指示偏离  $10^\circ$  以上。因此, 在国际上, 对舰载、机载、星载及地面武器、弹药的电磁环境都有严格要求。1993 年, 美国西北航空公司发表公告, 限制乘客使用移动电话、调频收音机、便携电脑等, 以免干扰导航系统。

### 6.2.3.3 对军用器械的危害

射频辐射能量对军械系统的危害最早由英国人在 1932 年提出, 某国在 20 世纪 50 年代也发现电磁辐射对军械的危害问题(Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance, 简称 HERO 问题)。该国海军特别重视 HERO 问题, 这是因为舰船上电子设备成倍增加, 但甲板的空间、面积有限, 不可能像在陆地上那样用拉开距离的方法来隔离。此外, 海军使用的无线电、雷达等的频带很宽、功率很大, 加上舰船上层建筑及金属构件的不规则反射, 使通信和雷达天线的近场分布复杂, 电磁环境恶劣。英阿马岛之战, 英国谢菲尔德号导弹驱逐舰由于雷达与通信网络相互干扰, 不能同时工作, 当谢菲尔德号导弹驱逐舰与英国本土通信时, 恰遇阿根廷的飞鱼导弹来袭, 导致舰毁人亡。

电引爆装置已成为现代军械系统必不可少的组成部分, 在军用飞机上电引爆器应用多达几十枚。然而, 电磁波通过电爆装置的控制线路, 感应耦合形成干扰电流可引起爆炸。1949 年, 在美国杜邦公司的石油勘探船上, 一台 50W 发射机的水平天线(长 76m, 工作频率 1 602kHz)在一枚 5 磅烈性炸药的引爆电路上感应出 0.42A 的电流而引起爆炸。

此外, 像飞机机翼悬挂的副油箱在无线电辐射干扰下引起误投放、雷达使火箭发射、军舰的鱼雷在调频广播电台电磁波作用下出现意外发射等, 类似事故屡见不鲜。因此, 在军械系统工程设计中, 明确规定了安全距离和安全系数的要求, 以便控制电磁干扰能量可能造成的危害。例如 GJB786 中规定, 电引爆器导线上的电磁干扰感应电流和电压必须小于最大不发火电流和电压的 15%。

#### 6.2.3.4 对民用设备的危害

电磁干扰作用会使电子元器件降级或失效而造成电子仪器设备的性能改变和功能失效。一般硅晶体管 E 和 B 之间的反向击穿电压为 2~5V, 而且它还随温度升高而下降, 电磁干扰中的尖峰电压很容易把它损坏。晶体管在射频电磁波的照射下, 还能吸收足够的能量使结温升高, 造成二次击穿而损坏。

##### 1. 医疗设备的失灵

当今, 许多医疗设备都采用了先进的电子和信息技术。这些设备的抗扰度如何直接关系到人们的生命安危。如心脏起搏器往往受到来自计算机、手机等的电磁干扰, 使其功能发生变化。1992 年, 某救护车将一位心脏患者送往医院, 车上的监视器/电振发生器处于工作之中。但当医务人员打开无线电话机请求帮助时, 心机关闭, 结果这位患者死了。分析表明: 救护车顶由金属材料改为玻璃钢, 使监视器单元暴露在高电磁场内, 受到强烈的干扰。

##### 2. 电吹风机引起的民事罚款

美国洛杉矶 Hartman 公司曾经支付 6 万美元的民事罚款, 以补偿其 1992 年生产的型号为 Hartman Pro1600 的吹风机由于自身缺陷给消费者带来的损失。美国消费品安全委员会 (CPSC) 认为, 这些吹风机在开/关旋钮处于“断开”位置时能自动接通电源, 当加热器工作时, 其风扇不转, 可能引起内部器件过热而发生火灾。

##### 3. 抽油站的电磁干扰

2001 年 10 月 16 日, 苏格兰的两个石油中转站刚刚启用两台 6MW 可变速感应电动泵, 当地电站和电话局便收到如潮水般涌来的投诉。从区域看, 投诉集中在距离这两台设备的高空供电线 (33kV) 12 英里 (1 英里=1.609 3km) 以内的范围。距离供电线 4 英里的付费电话非常嘈杂, 几乎不能使用。然而仅隔一条街道, 一住户的电话却不受影响。其他征兆还有: 电视帧同步丢失 (屏幕滚动), 辉光放电电路振铃。尽管这两台装置的设计符合电力工业的 G5/3 谐波标准, 但上述现象证实这两台装置包含的更高次谐波, 事实上可达 100 次 (5kHz)。最终, 该问题引起政府部门的注意, 决定停机做防干扰补救工作。

##### 4. 对交通工具的危害

现代交通工具越来越多地依赖于电子系统。对车载接收、监控和定位等电子控制系统来说, 如果电磁抗扰度不够, 就很容易受空间电磁环境干扰而不能正常工作, 甚至失控造成事故, 如气囊的保护失灵; 铁路道岔的信号自动控制, 如果因电磁干扰造成误控, 将会给列车的行驶带来不堪设想的灾难。

##### 5. 信息电子设备的电磁干扰

信息电子设备是指接收、处理以及输出数据的设备, 以计算机为典型代表。随着微电子技术的发展, 高速度、高集成度使信息设备的辐射加重, 低压、高灵敏度使设备的抗扰度降低。因此, 电磁环境的干扰和系统内部的相互串音, 严重地威胁着信息设备工作的稳定性、可靠性和安全性。

印制电路板 (PCB) 是信息电子设备的重要组成部分, 印制电路板中带状线、电线、电缆之间的串音是印制电路板线路中存在的最难克服的问题之一。串音是由电场通过互容、磁场通过互感引起的, 具体确定哪种耦合模型, 主要取决于线路阻抗、频率和其他因素。一般来说, 在高频时电容耦合是主要的, 但是如果源或接收器之一或两者采用屏蔽电缆并在屏蔽层两端接地, 则磁场耦合将是主要的。低频一般有较低的电路阻抗, 电感耦合是主要的。

在很多情况下, 数字 PCB 产生的辐射问题要比模拟 PCB 更为严重。数字电路的驱动电流较

大,致使辐射的强度也较大,其辐射频率可从几兆赫到数百兆赫。

## 6. 雷击造成的危害

自古以来,雷电灾害一直存在。

200 多年前,富兰克林发明避雷针以后,建筑物等设施已得到了一定的保护,人们认为可以防止雷害,对防雷问题有所松懈。但是随着近代高科技的发展,尤其是微电子技术的高速发展,雷电灾害越来越频繁,损失越来越大,原先的避雷针已无法保护建筑物、人和电器设备。

20 世纪 80 年代以后,雷灾出现新的特点,这主要是因为现代化的城市中高层建筑日益增多,造成雷电击穿空气的距离缩短,因为雷击的概率与建筑的高度成正比,所以雷击概率加大。一些高层智能大厦、微波站、天线塔等都会吸引落雷,从而使本身所在建筑及附近建筑遭到破坏。增设的各种架空长导线反倒引雷入室,使避雷装置失去作用。同时,由于全球气候变暖,城市热岛现象增多,使城市的大气环流形势出现了新特点,夏季雷暴期延长。而更重要的是,随着科技的进步,微电设备被广泛应用,城市通信电源大幅增多,城市电磁场发生变化,使雷害对象也发生了转移,从对建筑物本身的损害转移到对室内的电器、电子设备的损害,乃至发生人身伤亡事故。

雷电危害可分成直击雷、感应雷和浪涌三种。

### (1) 直击雷

直击雷在雷暴活动区域内,雷云直接通过人体、建筑物构架或动植物上,因电效应、热效应和机械效应等造成建筑物损坏以及人员伤亡。建筑物或设备等对地放电所产生的电击现象,称为直接雷击。此时雷电的主要破坏力在于电流特性而不在于放电产生的高电位。雷电击中人体、建筑物或设备时,强大的雷电流转变成热能;雷击放电的电量大约为  $25\sim 100\text{C}$ 。据此估算,雷击点的发热量大约  $500\sim 2\,000\text{J}$ ,该能量可以熔化  $50\sim 200\text{mm}^3$  的钢材。因此,雷电流的高温热效应将灼伤人体,引起建筑物燃烧,使设备部件熔化。在雷电流流过的通道上,物体水分受热汽化而剧烈膨胀,产生强大的冲击性机械力。该机械力可以达到  $5\,000\sim 6\,000\text{N}$ ,因而可使人体组织、建筑物结构、设备部件等断裂破碎,从而导致人员伤亡、建筑物破坏,以及设备毁坏等。

雷电流在闪击中直接进入金属管道或导线时,它们沿着金属管道或导线可以传送到很远的地方。除了沿管道或导线产生电或热效应,破坏其机械和电气连接之外,当它侵入与此相连的金属设施或用电设备时,还会对金属设施或用电设备的机械结构和电气结构产生破坏作用,并危及有关操作和使用人员的安全。雷电流从导线传送到用电设备,如电气或电子设备时,将出现一个强大的雷电冲击波及其反射分量。反射分量的幅值尽管没有冲击波大,但其破坏力也大大超过半导体或集成电路等微电子器件的负荷能力,尤其是它与冲击波叠加,形成驻波的情况下,便形成一种强大的破坏力。

### (2) 感应雷

感应雷是雷电在雷云之间或雷云对地放电时,在附近的户外传输信号线路、埋地电力线、设备间连接线产生电磁感应并侵入设备,使串联在线路中间或终端的电子设备遭到损害。感应雷虽然没有直接雷猛烈,但其发生的概率比直击雷高得多。感应雷的破坏也称为二次破坏。雷电流变化梯度很大,会产生强大的交变磁场,使周围的金属构件产生感应电流,这种电流可能向周围物体放电,如附近有可燃物就会引发火灾和爆炸,而感应到正在联机的导线上就会对设备具有强烈的破坏性。感应雷击所造成的破坏性后果一般体现于下列四种层次。

① 传输或储存的信号或数据,不论数字或模拟的都会受到干扰或丢失,甚至使电子设备产生误动作或暂时瘫痪。

② 由于重复受到较小幅度的雷电冲击,元器件虽不致马上烧毁,但却已降低其性能及

寿命。

③ 若情况较严重时, 电子设备的线路板及元器件便当即烧毁。

④ 整个系统停顿。

据统计, 直击雷的损坏仅占 15%, 感应雷与地电位提高的损坏占 85%。

### (3) 浪涌

最常见的电子设备危害不是由于直接雷击引起的, 而是由于雷击发生时在电源和通信线路中感应的电流浪涌引起的。一方面由于电子设备内部结构高度集成化 (VLSI 芯片), 从而造成设备耐过压、耐过流的水平下降, 对雷电 (包括感应雷及操作过电压浪涌) 的承受能力下降; 另一方面由于信号来源路径增多, 系统较以前更容易遭受雷电波侵入。浪涌电压可以从电源线或信号线等途径窜入微电子设备。我们就电源浪涌和信号系统浪涌两个方面分别讨论它对弱电设备的危害。

① 电源浪涌。电力电网绵延千里, 不论是雷击还是线路浪涌发生的概率都很高。当几百千米的远方发生了雷击时, 雷击浪涌通过电网线路传输, 再经过变电站衰减, 到达微电子设备时可能仍然有上千伏, 这个高电压对于微电子设备内部的半导体元器件有很大的损害。美国 GE 公司测定一般家庭、饭店、公寓等低压配电线 (220V/110V) 在 10 000 h (约一年零两个月) 内在线间发生的超出原工作电压一倍以上的浪涌电压次数达到 800 余次, 其中超过 1 000V 的就有 300 余次。这样的浪涌电压完全有可能一次性将电子设备损坏。

② 信号系统浪涌。信号系统浪涌电压的主要来源是感应雷击、电磁干扰、无线电干扰和静电干扰。金属物体 (如传输线) 受到这些干扰信号的影响, 会使传输中的数据产生误码, 影响传输的准确性和传输速率。排除这些干扰将会改善网络的传输状况。

目前, 直击雷造成的灾害已明显减少, 而随着城市经济的发展, 感应雷和雷电波侵入造成的灾害却大大增加。一般建筑物上的避雷针只能预防直击雷, 而强大的电磁场产生的感应雷和脉冲电压却能潜入室内危及电视、电话及联网微机等弱电设备。

目前, 雷电灾害已被国际电工委员会 (IEC) 称为“电子化时代的一大公害”。因随着微电子设备应用的日益广泛和普及, 雷电会导致对微电子设备多种不同形式的危害, 而目前仍没有任何一种办法可以全面防止雷电的危害, 只能通过各种有效办法将雷害的程度降到最低。

## 7. 电子工业领域的静电危害

### (1) 静电的危害形式

① 静电吸附。在半导体和半导体元器件制造过程中, 广泛使用石英及高分子物质制作的器具和材料; 由于它们的高绝缘性, 在生产中各物体所带静电位是非常高的。由于静电的力学效应就会使车间的浮游尘埃被吸附于半导体芯片上; 即使极少量的灰尘粒子附着在芯片上也会严重影响半导体成品的成品率。

为防止静电吸附, 制造半导体时必须在洁净室内进行。例如, 在超大规模集成电路的制造工程中, 必须使用超洁净室, 把空气尘埃粒子的大小控制在最小线幅的千分之一以内, 这就需要除尘效率极高的过滤器。同时, 洁净室的墙壁、天花板和地板等均应采用防静电的不发尘材料; 对操作人员及工件、器具也应采取一系列静电防护措施。

② 静电放电引起器件击穿。由 ESD 引起的元器件击穿损害是电子工业, 特别是电子产品制造业中最普遍、最严重的静电危害。在电子产品的生产中, 从元器件的预处理、插装、焊接、清洗、测试、总装、调试, 直到包装、储存、发送等工序, 由于接触-分离、摩擦、感应等作用, 都会使操作人员、工具、工作台面、元器件、元器件包装容器等产生静电, 同时可随时对器件造成 ESD 损害。

静电放电可能造成器件硬击穿或软击穿。硬击穿是一次性造成器件的永久性失效,如器件的输出与输入开路或短路;软击穿则可使器件的性能劣化,并使其指标参数降低而造成故障隐患。由于软击穿可使电路时好时坏(指标参数降低所致),且不易被发现,给整机运行和查找故障造成很大麻烦。软击穿时设备仍能工作,性能未发生根本变化,很可能通过出厂检验,但随时可能造成再次失效。多次软击穿就能造成硬击穿,使设备运行不正常,既给用户造成损失,也影响厂家声誉和产品的销售。

③ 静电感应。当导体和电介质置于静电场中,在其上感应出正或负静电荷,其静电电压的幅值取决于静电场强度。在半导体制造过程中产生的静电源能在半导体芯线、工具、器件包装容器等感应出较高的静电电压,造成对半导体芯片介质放电。

④ 静电放电时产生的电磁脉冲。静电放电可产生频带为几百千赫至几十兆赫、电平高达几十毫伏的电磁干扰脉冲。当这种干扰脉冲耦合到计算机和低电平数字电路时,致使电路发生翻转效应,出现误动作。强能量脉冲干扰,可使静电敏感器件遭到破坏。

### (2) 静电损伤的特点

① 隐蔽性。人体不能直接感知静电,除非发生静电放电,但发生静电放电,人体也不一定有电击的感觉。这是因为人体感知的静电放电电压为 $2\sim 3\text{kV}$ 。

② 潜伏性。有些电子元器件受到静电损伤后性能没有明显的下降,但多次累加放电会给器件造成内伤而形成隐患,而且增加了器件对静电的敏感性。

③ 随机性。电子元器件在什么情况下会遭受到静电破坏呢?可以这么说,从一个元器件生产后一直到它损坏之前所有的过程都受到静电的威胁,而这些静电的产生也具有随机性。

④ 复杂性。对静电放电损害未充分认识之前,常常归咎于早期失效或情况不明的失效,从而不自觉地掩盖了失效的真正原因。

## 8. 工频电磁辐射的危害

根据研究及相关测试表明,变压器、超高压配电装置和超高压输电线在运行中,会形成一定强度的工频电磁辐射。据相关资料显示,550kV 输电线的工频电场辐射在距地面 1.5m 处可以达到  $9.7\text{kV/m}$  之高。工频磁场对计算机显示器偏转系统可能产生较严重的干扰,具体现象是,使显示器的显示画面发生抖动,显示器边缘可能出现色斑;高强度的工频电磁辐射还可能造成计算机死机。

高压架空电力线路和变电站的运行,会产生无线电噪声。这种无线电噪声严重时,会对电力线路和变电站附近居民的无线电(主要是中、短波广播)接收和专业无线电台站的工作造成干扰。由于电力线路和变电站占地面积大,尤其是电力线路长度可能达几百千米,影响范围广,通常情况下,架空电力线路和变电站无线电噪声的产生有三种根源:分别是,第一种,在导线及其金属表面处空气中的电晕放电;第二种,绝缘子承受高电位梯度区域中放电并产生火花;第三种,连接松动或接触不良产生的间隙火花放电。当运行电压在 100kV 以上(通常导线表面电位梯度大于  $12\text{kV/cm}$ )时,第一种根源占据主导地位,成为不可消除的、属线路固有的特性。

## 9. 微波领域的电磁干扰

卫星地面站和雷达装置都会受到诸如特高频波段的电视信号、核电信号等干扰。移动电话正在我国蓬勃发展,可是它所产生的电磁干扰给持手机的人们带来许多困扰。手机的电磁辐射为点频微波辐射,在使用过程中,其电磁辐射以手机与基站(网)取得联系时最大,第一声铃响后,辐射逐渐减小。所以,在手机接通后的最初几秒之内,最好不要马上将手机贴耳接听。因为人的大脑和眼睛对辐射是比较敏感的,以免造成伤害。当然,在通话过程中,声调的高低、

声音的大小和快慢也会使辐射有所不同。另外,手机的类型不同,天线的内置或外置,其辐射都会有些差别。

#### 10. 核电磁脉冲的破坏

电磁脉冲武器是现代军事中一种利用核爆炸或其他方法产生的强电磁脉冲,去摧毁来袭导弹或破坏雷达、通信系统和武器系统中的电子设备,或扰乱人的大脑神经系统使人暂时失去知觉的先进武器。

电磁脉冲武器可使晶体二极管、晶体管、集成电路、电阻及电容、滤波器、继电器和粒波器等电子元器件受到损坏;可以与电缆、导线和天线等耦合,把电磁脉冲的能量传递给电子设备,引起电子设备的失效或损坏、电路开关跳闸和触发器翻转;能使根据磁通工作的存储器(磁鼓和磁带等)消磁或失真,破坏元器件或抹去存储的信息,传递假信号。1962年7月,美国在太平洋约翰斯顿岛上空400km处,爆炸了一颗140万吨TNT当量的氢弹。爆后,在远离爆心14000km的夏威夷瓦胡岛上,300多条大小马路上的路灯突然全部熄灭,数百具防盗报警器同时响了起来。人们经过近20年的研究。才彻底揭开了上述奇怪现象的奥秘,原来使路灯失明和使防盗报警器报警的“作案者”就是核电磁脉冲。

核爆炸产生的电磁脉冲能通过天线、电缆连接处、金属管道等进入电子设备内部,使电子设备遭到严重的破坏。核电磁脉冲对电子设备的破坏作用一般可分为两类:功能损坏和工作干扰。功能损坏是指电缆的绝缘材料被击穿或者电子设备的某些元器件受核电磁脉冲的作用而造成永久性损伤;工作干扰是指核电磁脉冲虽然没有使系统或器件受到破坏,但引进的附加信号使某些器件的工作状态改变,导致电子设备的功能紊乱,发出错误信号,或消除和改变存储器中的内容。例如,一次百万吨级核弹空中爆炸后,处于待命状态的导弹,由于弹上计算机内存储的信息被清洗,便不能再按指令发射了。因此,有些军事专家把核电磁脉冲称为“兵器电子元件的克星”、“电子对抗的终极手段”。

电磁脉冲和光辐射、冲击波一样,都是在核爆炸瞬间引起杀伤破坏作用的。电磁脉冲能在电子设备的导体中感应很大的瞬时电压和电流,使电子设备、电路和元器件受到不同程度的干扰和破坏。集成电路取代晶体管使电子设备的抗击穿能力大大下降,集成电路的抗击穿能力为晶体管的千分之一,为电子管的百万分之一乃至千万分之一。因此,俄罗斯的某些军用飞机上无线电台还在采用超小型电子管而不用晶体管和集成电路;很多国家野战电台还是用分立元件装配,这些都是为了增强设备的抗毁能力。另外,现在电子计算机广泛使用大规模集成电路制作,核电磁脉冲的强磁场很容易抹去存储器中的记忆,或者使某些“0”和“1”颠倒,从而出现混乱。

国际电工委员会TC77技术委员会已成立SC-77分会专门加强对核电磁脉冲影响的研究工作。需要指出的是,不少人认为光缆可不受外界电磁场影响,但实际上在强电磁脉冲作用下光纤会发热引起机械变形等后果,也将直接影响光纤的传输特性。此外,直击雷还会使光纤极化偏转,故不可忽视这方面的防护技术。

目前,美、俄等国正在研制核电磁脉冲弹,平均每天投入试验的经费以百万美元计。核电磁脉冲的后果是破坏电子设备而毫不伤害人,使敌方陷入无电源、无通信、无计算机的三无世界。

#### 6.2.3.5 对信息安全的危害

信息处理设备的电磁辐射有下述两方面的影响:

- (1) 对周围的电子系统构成窄带与宽带干扰,对电磁环境构成污染;
- (2) 对信息安全构成严重威胁,造成潜在的信息泄露问题。



当使用计算机进行信息处理时,键盘、显示屏等都会产生辐射使信息泄露出去。某国是最早利用电磁辐射泄露获取情报和重视防信息泄露的国家。20世纪70年代,该国一名潜水员在另一国家领海纵深内部的某海域120m深的海底军事通信电缆上安装了一个6m长的窃听设备,该设备大量记录了所有经过电缆的通信信号。某国国家安全和国防部从20世纪60年代就开始研究制定并逐步完善防电磁泄漏标准,就是用于计算机及信息设备防信息泄露的研究,被称作TEMPEST技术。

TEMPEST的具体内容是针对信息设备的电磁辐射与信息泄露问题,从信息接收和防护两个方面所展开的一系列研究和研制工作,包括信息接收、破译水平、防泄露能力与技术、相关标准及管理手段等。在信息化社会,研究计算机TEMPEST技术已和研究计算机病毒一样,被认为是涉及计算机安全的重要方面,受到国内外学者的广泛关注。

### 6.2.3.6 对人类健康的危害及防护

在地球上各式各样的电磁波充满人类生活的空间,无线电广播、电视、移动通信、无线电遥控、导航、高压送配电线等均向空中和地面辐射强大的电磁波能量。电子产品或设备在空间形成的许多电磁波不仅相互干扰,使它们的功能异常,而且当达到一定强度时,在无形中对人产生伤害。

早在18世纪,伽凡尼(Galvanic)就研究过电磁波对生物组织的作用。第二次世界大战以后,由于无线电技术的发展,电磁波的广泛应用,社会公众更多关心电磁波辐射对生物,特别是对人体的影响。现在这一现象的研究已成为热点。从人类开始大规模使用电能到现在也不过才100多年历史,那么人们不禁要问,人类在地球上已生存了几十万年,人类的生存和发展过去仅仅是在地球自然磁场伴随下的,而近百年人类却要生活在数百万千瓦的电能环境中,对人的生态及人体的健康究竟会有什么影响呢?电磁波和生物组织的作用,有很强的频率依赖性。当前研究最多的是两个频段,一个是电力工频(50~60Hz),另一个是无线电波段(射频),包括微波在内。近年来,在这一研究领域获得很大进展,形成了一系列无线电辐射、照射的标准。

#### 1. 中短波电磁辐射的危害

中短波高频辐射对机体的主要作用是引起中枢神经的机能障碍和以交感神经疲乏紧张为主的植物神经紧张失调。临床症状主要表现为神经衰弱症候群,以头昏、头胀、失眠多梦、疲劳无力、记忆力减退、心悸、眼睛出现白内障、毛发脱落等最为严重;其次较突出的是头痛、四肢酸疼、食欲不振、脱发、体重下降、多汗等症状;部分女工发生月经周期紊乱,少数人员指颤、易激动;此外,通过体检还发现心血管系统有某些改变现象。例如,心电图方面出现心动过缓及心律不齐等现象。

#### 2. 微波辐射对人体的危害

联合国环境组织已将射频和微波辐射作用作为造成公害的主要污染之一。

##### (1) 微波辐射作用于生物体后,一部分被反射,一部分被吸收

被吸收的微波辐射能量使生物体组织内的分子和电介质的偶极子产生振动,媒质的摩擦把动能变为热能,从而引起温升。电磁辐射通过对细胞加热使外部感觉神经末梢受到加热刺激作用产生病理、生理和神经反应称为热效应。

微波的热效应对人体的影响,主要反映在心血管系统,如心动过速、高血压等。心电图检查可见窦性心律不齐、窦性心动过缓、T波下降等变化。长期处在高强度微波作用下,部分工作人员会发生脑生物电流改变等现象。

眼睛是人体对微波辐射热效应比较敏感的器官。一方面眼睛的晶状体含有较多的水分,吸收较多的微波能量;另一方面血管又较少,不易带走过量的热。在微波照射下,可能眼的表层组织角膜还没有出现伤害,而晶状体已出现水肿。在高强度、长时间作用下会造成晶状体混浊,严重的将导致白内障;更强的照射会使角膜、虹膜、前房和晶状体同时受到伤害,以致造成视力完全丧失。

### (2) 除了上述热效应外,微波辐射对人体还有非热效应

人体暴露在强度不大的微波辐射环境中,体温没有明显升高,但往往出现一些生理反应,主要表现在:

① 对神经系统的作用。长时间微波辐射可破坏脑组织细胞,使大脑皮质细胞活动能力减弱,已形成的条件反射受到抑制。反复经微波辐射可能引起神经系统机能紊乱。长时间在微波辐射强度较高的环境下工作的人员,会出现过度疲劳、头痛、手发抖、心电图和脑电图变化、甲状腺活动性增强、血清蛋白增加、脱发、嗅觉迟钝、性功能衰退等症状。

② 对造血系统的作用。雷达专职人员的白血病发病率高。长期的微波辐射可引起血液内白细胞和红细胞的减少,并使血凝的时间缩短。

③ 对消化系统的作用。长期从事射频辐射的人员食欲欠佳、胃部不适、恶心、吐酸水等慢性胃炎症状相对较多,个别人员可能出现胃液中总酸度及游离酸降低。

### (3) 微波辐射对生物危害的另一特点是它的累积效应

一般一次低功率照射之后会受到某些不明显的伤害,经过几天之后可以恢复。如果在恢复之前受到第二次照射,伤害就将累积,这样多次累积之后就会形成明显的伤害。而长期受到低功率照射的人员,在停止微波工作后1个多月才能恢复。但必须指出,只有低功率照射,受损人体机能才能恢复;功率很大,从事此项工作的时间又长,损害将会是永久的。

### 3. 低频电磁场对人体的危害

国外医学研究结果表明,工频电站以及高压输电线产生的工频电磁场对人体组织将产生有害影响。据德国医学杂志报道,住在高压输电线附近的居民,由于工频电磁场的长时间作用,血液和神经系统会发生变性,患白血病及脑瘤的危险度有所增加。有一位妇女曾向法院告状:自从电力总局在她的农场附近架设高压电线以来,她的奶牛产奶量开始减少,因此要求赔偿损失。后经鉴定,电线附近的电场确实能影响家畜乳腺的正常功能。

在美国电磁环境问题、特别是超高压输电线路下的电磁环境问题是在1972年50万伏输电线路开始应用时提出来的。在美国这一电磁环境问题已发展成为居民的切身利益问题,引起电磁环境问题的因素是输电线电晕放电的杂波(可听噪声等)、臭氧以及导体内电流及电压所产生的磁场及电场。美国华盛顿州梅鲁哈门博士通过调查发现:在电站工作的人员以及电影放映员、电子设备装配工、无线电信员和电话线架设人员患白血病发病率高;在与电工相关的工作人员中,白血病危险度可升高达2倍。他认为这是从事这些职业的人员长期置身于电磁场中的缘故。

通常,由于输电电压的提高,更大功率的输电成为可能,土地也能得到更有效的利用,这时输电线路下的电场环境问题就进一步恶化。地下输电线是架空输电线建设成本的12~16倍左右,在实际中广泛应用是有困难的。

国外曾用白鼠进行低频场影响的实验,将有屏蔽保护和无屏蔽保护的鼠群分别暴露在1kHz、200V/m场强环境中,6周后;10kHz、320V/m场强环境中,5周后;10kHz、3000V/m场强环境中,或25kHz、3000V/m场强环境中,3周后。发现1kHz、200V/m低频电磁场对白鼠体重无重要影响,但是其他频率及强度的低频电磁场可使白鼠体重明显减少,最为严重的是25kHz、3000V/m的电磁场。

10kHz 和 25kHz 的低频电磁场还或多或少地影响到其他器官组织。

#### 4. 静电对人体的危害

地球本身与大气电离层构成一个巨大的静电场，地面附近电场强度约 130V/m，电场方向垂直指向地面。它使人体头、脚之间呈现一至二百多伏的电动势差，空气中的电荷通过人体流向大地。宇宙射线及地球上各种放射源使空气电离，地表附近空气总离子密度约  $1\ 500$  个/cm<sup>3</sup>，正负离子之比为 1.2:1，人类的各种生理现象都与这个静电场息息相关。

人体静电具有小电量、高电压的特点。例如，人穿绝缘底鞋，在干燥环境中脱衣服，能带上 6 万伏高压，人体静电的危害来自静电放电。带电的人靠近导体时，电场分布发生改变，电力线在导体表面集中，局部场强增高，一旦超过空气击穿场强将引起空气电离，发生放电。这种放电是在几十微秒内完成的，令人有刺痛感，人体带电大于 3kV 时，就能感到针刺样放电疼痛；电压若大于 1 万伏，则使前臂有强烈痛感，这时人们往往会受到惊吓并产生恐惧情绪。

静电电击是瞬间大电流冲击过程，与交流电触电有不同特点，它没有持续电流通过人体，不会引起心肌纤颤。人对静电电击的感知阈值取决于流过皮肤放电点的电流密度和持续时间，一般来说，青年人比老年人感知电压低，女性则比男性对静电电击敏感。在生产过程中，静电电击还可能发生高空坠落或其他工伤事故，有时使人误认为是金属漏电。

另外，人长期处于带电状态会感到头晕、烦躁，其电场作用能吸附空气中的离子和各种尘埃，其中含有不少有害物质。从这个意义上讲，消除人体静电也是必需的。

#### 5. 电磁波对生殖的影响

一定强度的电磁辐射可影响人的性功能，临床上男性表现为性功能低下和暂时性不育（我国有些地方曾用过厘米波局部辐照来进行暂时性男性绝育），女性出现月经周期紊乱等症状。孕妇妇女接触一定强度的 CRT 显示屏可导致流产及后代出生缺陷。国内曾对长途电话工作人员作过一次调查，发现使用显示屏的 29 名孕妇中有 6 名流产，占 21%；而不使用的 126 名孕妇中，流产的有 11 名，占 9%。

#### 6. 人体防辐射的一般措施

对高频电磁场的辐射可按以下步骤采取有效措施进行防护。

- (1) 对人们工作地区单位面积的高频辐射能量进行测量。
- (2) 在适当地方设置警告性标志，以提醒人们注意。
- (3) 在危险区域周围设置障碍，如围墙等建筑物。
- (4) 在维修电子设备时或需在危险区内时，先关闭高频源。

(5) 在高频源不能关闭时，可穿屏蔽衣或将高频源的输出降至安全水平。微波辐射防护服由绝缘外罩、防护层和衬里 3 层组成，穿着柔软舒适，可有效防止微波辐射对人体的危害。为了轻便，有时可着屏蔽裙、屏蔽帽或防护眼镜，以保护人体主要部位的安全。

- (6) 在天线方向侧瓣或后瓣等处，采用屏蔽措施减少辐射。

- (7) 对工作在高频电磁场作用下的人员定期检查身体，并做出记录。

#### 7. 微波辐射的医疗防护

微波辐射对患者的患部能起到治疗作用，但对医护人员却是有害的辐射源。医疗防护包括两个方面，即微波设备防护和医护人员的防护。

##### (1) 微波设备的防护

在设备的安装与使用过程中遵循以下原则，可以避免设备高压电击和微波辐射导致的人体损伤。

① 安装。在生产厂方的指导下，配合医院的微波工程技术人员进行下述工作。

- a. 认真阅读说明书、电路、结构和安装注意事项。
- b. 结合对设备的内部部件检测，熟悉电路、工作原理及使用方法和注意事项。
- c. 保证设备安全接地，以维护设备和人身安全。
- d. 安装完毕，进行试机和漏能检测。最后在计划过程中，对该设备的性能进行测试。

② 使用与维护。操作人员在使用前，严格遵守操作规定，维护规定设备记录之外，还应当做到：

- a. 在使用过程中，注意设备的异常情况。
- b. 在出现异常情况时，请微波技术人员处理。
- c. 定期检查设备。包括设备外的馈线，连接头辐射器的漏能辐射。
- d. 在微波治疗时，患者治疗区域及其邻近区域不得有金属或其他导电物品。对人体内含有金属物而又必须施加微波辐射时，只能采用低强度，避免灼伤，对不需要治疗的部位，采用微波吸收材料加以保护。

### (2) 医务人员的防护

① 有既往中枢神经系统疾病、神经衰弱、癫痫、精神病史；心脏或血管质性病、血压异常；血液系统或造血功能障碍；白内障、视神经疾病者均不宜从事微波工作。

② 从事微波照射的医务人员，每年做一次预防性体检。检查白细胞、血小板、脑电图、心电图、眼球晶状体、眼疾、视力和血压等。如果已发现微波引起的早期症状，应及时治疗；应对微波的辐射剂量和个人防护予以调整。

③ 从事微波医疗职业的医护人员，应注意个人防护，特别要注意大剂量或大强度时，要穿戴微波防护服、围裙、罩衫、头盔、眼镜、手套、鞋、袜等，并尽量不要连续 5、6 小时工作。

人们由于长期受地球磁场的作用，一旦处于“电磁真空”环境下也不适应，将受到“电磁饥饿”的危害。近十几年美、俄等国通过研究已经得出结论：对于生物来说，长期与地磁场隔离，会发生一系列的变化，昆虫、鱼、鸟类丧失测向本领，在生物种群中间，自然突变率提高，促成恶性肿瘤和其他病症的发生等，人体如果处于“磁场真空”的环境中，则首先发生中枢神经系统的功能变化。对“电磁污染”及“电磁饥饿”的研究形成了“电磁生态学”。

应该指出，这类问题的研究并未引起人们的广泛重视，即使在国外某些技术先进国家，也还有人不顾电磁场的不利影响，大力开展利用电磁场的一些实验，例如利用磁场增殖水产，破坏生态。因此，在今后，生理学、医学、农业学、生态学、电磁学等方面有必要开展广泛的合作进行研究。

## 6.3 电磁干扰的传播

本节着重介绍电磁干扰的耦合与传输概念，主要内容包括电磁干扰的耦合途径、传导耦合以及电磁辐射的原理。

### 6.3.1 电磁干扰的三要素

所有电磁兼容性问题毫无例外地包含两个因素，一个是干扰发射源，另一个是对该干扰敏感的受害者。若这两者都不存在，也就没有电磁兼容性问题。如果干扰源和受害者在同一设备单元内，称“系统内”电磁兼容性问题；如果干扰源和敏感设备是两个不同的设备，例如，计算机监

视器和无线电接收机,则称为“系统间”问题。大部分电磁兼容标准都是针对系统间电磁兼容的。表 6-7 给出了一些常见的电磁干扰源和敏感器。

设备要满足性能指标,减小干扰耦合往往是消除干扰危害的唯一手段,因此弄清楚干扰耦合到受害者上的机理是十分必要的。在电磁干扰源和敏感器之间还需要传播路径来传输能量。电磁干扰屏蔽通常改变电磁能量传播路径来达到的。图 6-24 示出了可能的环境电磁干扰源和作用于敏感设备(以电视接收机为例)的潜在干扰传播途径。

表 6-7 电磁干扰源和敏感器

电磁干扰源	电磁干扰敏感器
电视和广播	航空导航系统
等幅波发射机	微处理器
电气电动机	高保真设备
遥控单元	计算机
电焊装置	等幅波接收机
电气设备	心脏起搏器
发动机点火系统	电子测量设备
雷达发射机	广播和电视接收机
电动工具	电子车库门

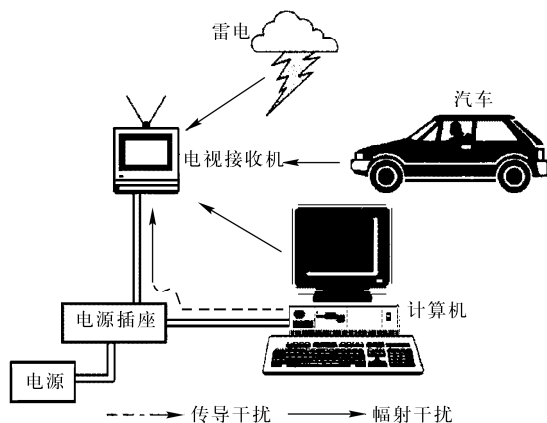


图 6-24 环境电磁干扰源作用于敏感设备的耦合途径

一般地,电磁干扰源发出的电磁能量通过某种耦合通道传输至敏感设备,导致敏感设备出现某种形式的响应并产生效果,这一作用过程及其效果称为电磁干扰效应。任何一个电磁干扰效应必须具备三个基本条件:第一,应该具有电磁干扰源,即要有产生电磁能量的物体或现象,如日光灯的开关、汽车的点火系统、雷达、大功率用电设备、处理数字信息的设备、雷电放电等;第二,要有传输干扰能量的途径(或通道);第三,还必须有被干扰对象(敏感设备)的响应。电磁干扰源是指产生电磁干扰的任何元件、器件、设备、系统或自然现象。使电磁干扰能量传输至敏感设备的通路或媒介则被称为干扰传播途径(或耦合途径、耦合通道)。敏感设备是被干扰对象的总称,它可以是一个很小的元件或一个电路板组件,也可以是一个单独的用电设备,甚至可以是一个大系统。

电磁干扰源、干扰传播途径和敏感设备称为电磁干扰三要素。形成电磁干扰时,电磁干扰源、耦合途径、敏感设备这三个要素缺一不可。这就是说,能产生巨大电磁能量的干扰源,如大功率雷达、核爆炸、雷电放电等,未必一定能够形成电磁干扰,只能说它们是潜在的电磁干扰源。大部分人为干扰源都是无意发射的,它们通常伴随着用电设备实现某种电能转换而产生,因此企图完全消除干扰源的存在,往往是极其困难的,甚至是不可能办到的。

事实上,同一设备在一种情况下是干扰源,而在另一种情况下或许是受害者。比如两条相距很近的导线 A 和 B, A 中流过 500kHz 的高频电流, B 中流过 1MHz 的高频电流,由于电磁感应,结果在 A 中感应了少量 1MHz 的电流,在 B 中也感应了少量 500kHz 的电流。

敏感设备受电磁干扰的程度用敏感度来表示。敏感度指敏感设备对电磁干扰所呈现的不希望有的响应程度,其量化指标是敏感度门限。敏感度门限是描述敏感设备电磁特性的重要参数,指敏感设备最小可分辨的不希望有的响应信号电平,也就是敏感电平的最小值。敏感设备的敏感度越高,则其敏感电平越低,抗干扰能力越差。

不同类型的敏感设备,其敏感度门限的表达式是不一样的,大多数是以电压幅度表示,但也有以能量和功率表示的,如受静电放电干扰的设备为能量型,受热噪声干扰的设备为功率型。电子设备是所有用电设备中性能优良、体积较小、应用广泛的一种,其敏感度主要取决于电子设备的灵敏度和频带宽度。一般认为电子设备的敏感度与灵敏度成反比,与频带宽度成正比。

电磁干扰和电磁兼容就是存在干扰源的两种结果,干扰和兼容两者可以相互转化,转化的条件是改变“三要素”的变量关系。需要尽量削弱干扰源,抑制干扰传播途径,降低每个设备的敏感度。由此可见,电子设备防干扰工程是一项系统工程,必须在工程设计中全面规划,同时对每个用电设备按照国家制定的电磁兼容标准规范来限制它的电磁发射,降低它的敏感度,使它具备防干扰的能力。

### 6.3.2 电磁干扰的传输途径

电磁干扰的传播一般有两种方式,即传导耦合方式和辐射耦合方式。在简单系统中,干扰源和干扰途径较容易确定,例如家用电吹风机工作时,使电视机屏幕出现“雪花”干扰。其中吹风机内电动机电刷的火花放电是干扰源;火花放电辐射的电磁波通过空间传播到电视机天线回路被接收,空间辐射耦合是传播途径;电视机是敏感设备,因此干扰也就比较容易排除。

许多电子设备的硬件包含着具有天线能力的元件,例如电缆、印制电路板的印制线、内部连接导线和机械结构等。这些元件可以电场、磁场或电磁场方式传输能量并耦合到线路中。在实际中,系统内部耦合和设备间的外部耦合,可以通过屏蔽、电缆布局以及距离控制得到改善。地线面或屏蔽面既可以因反射而增大干扰信号,也可以因吸收而衰减干扰信号。电缆之间的耦合既可以是电容性的,也可以是电感性的,这取决于其走向、长度和相互距离。绝缘材料也可以因吸收使减小场强,尽管在许多场合与导体相比可以忽略。

然而,在现代电子设备的复杂系统中,干扰源和干扰途径并不那么一目了然。有时一个元器件它既是干扰源,同时又被其他信号干扰;有时一个电路有许多个干扰源同时作用,难分主次;有时干扰途径来自几个渠道,既有传导耦合,又有辐射耦合。正因为确定电磁干扰三要素的复杂性和艰巨性,才使防干扰技术变得越来越受关注和重视。

#### 6.3.2.1 传导干扰

传导传输必须在干扰源和敏感器之间有完整的电路连接,干扰信号沿着这个连接电路传递到敏感器产生干扰现象,称为传导干扰。这个传输电路可包括导线、设备的导电构件、供电电源、公共阻抗、接地平面、电阻、电感、电容和互感元件等。这样就有可能使一个设备(或单元电路)的电磁能量沿着这类导线传输到毗连设备和单元电路,造成干扰。

##### 1. 共电源耦合

(1) 沿电源线传导的电磁干扰 电网中连接着各种电气、电子设备,这些设备在启动、工作、切换时都要向电网传输频谱相当宽的电磁干扰。此外,在电子系统或电子设备内部,也会通过公共电源线构成各部分的相互干扰。图 6-25 说明了干扰源(电动机)的干扰通过电源线直接传输到感受器(信号电路)上的情况。这种干扰在采用激光加工或晶间管调速的场合将会成为十分严重的问题。

(2) 通过公共电源内阻的耦合 一个公用电源给几个负载供电是常见的事,这种共电源的供电方式会造成传导耦合干扰,图 6-26 是一个共电源供电电路。当电路 1 中发生一个突变,出现干扰电流时,它就会产生一个干扰电压增量,导致电源端电压变化,从而传递到电路 2 中。实质

就是由电源内阻抗引起的传导耦合, 只要任一负载电路中产生干扰信号, 都会通过电源内阻耦合传导到其他负载电路中。

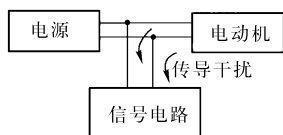


图 6-25 电源线的传导干扰

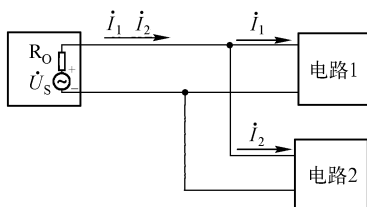


图 6-26 共电源供电电路

## 2. 公共阻抗耦合

公共阻抗耦合是由于干扰源与受害者共用一个线路阻抗而产生的。最明显的公共阻抗是阻抗实际存在的场合, 例如干扰源和受害者共用的导体; 但公共阻抗也可以是由两个电流回路之间的互感耦合, 或者由于两个电压节点之间的电容耦合产生的。理论上, 每个节点和每个回路通过空间都能耦合到另一节点和回路; 实际上, 耦合程度随距离增大急剧下降。

在电子系统或电子设备内部, 往往几个设备或电路单元的电流流经一条公共地线, 各设备或单元的电流在流过地线阻抗时就产生压降, 造成各单元对地电压的相互影响和牵制。公共地阻抗耦合是指设备与设备之间的公共接地线的阻抗所产生的干扰传递。公共地线包括机壳接地线、机框搭接线、金属接地板、接地网络和接地母线等。

图 6-27 是公共地阻抗耦合的实际电路。图 (a) 中电源电流的干扰分量可经过地线阻抗形成降压作用到信号回路, 传导到信号电流中 (虚线所示)。图 (b) 中  $I_1$  电流经过 GH 段地线阻抗耦合到  $I_{b3}$  中。

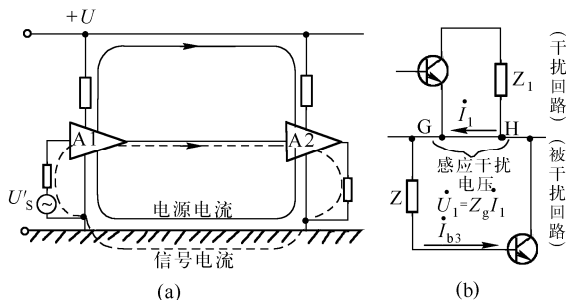


图 6-27 公共地线阻抗耦合

经常在一段公共地线的两端连接着多个回路, 每个回路的电流都会在其地阻抗上产生压降, 在这种情况下分析某个接收回路的干扰电压时, 应该将它们按矢量相加。

## 3. 公共负载干扰

在低电平电路和高电平电路的公共阻抗上, 由于流过电流而引起感应干扰电压形成干扰。当两个电路的导线都接在一个焊片上时, 由于焊片具有阻抗, 这时经过公共焊片会产生公共负载干扰。

### 6.3.2.2 辐射干扰

辐射干扰是指通过空间传播的电磁干扰。干扰源的电源电路、输入/输出信号电路和控制电路等导线在一定条件下都可构成辐射天线, 当干扰源的外壳流过高频电流时, 此外壳本身也就成为辐射天线。干扰能量按电磁场的规律向周围空间发射。常见的辐射耦合有下面三种。

(1) A 天线发射的电磁波被 B 天线意外接收, 称为天线对天线耦合。

(2) 空间电磁场经导线感应而耦合, 称为场对线的耦合。

(3) 两根平行导线之间的高频信号感应, 称为线对线的感应耦合。

### 1. 电场干扰

在感应场区有电容耦合和电感耦合两种形式, 在高阻抗的高频电路中最易产生电容耦合。两个电路中的导体, 当它们靠得比较近且存在电位差的时候, 一个电路中导体的电场就会对另一个电路中的导体产生感应, 反之亦然; 两者相互作用、相互影响使它们的电场发生变化, 这种交链称为电场耦合。见图 6-28。

两个导体电场耦合的程度取决于导体的形状、尺寸、相互位置和周围介质的性质, 也就是取决于两导体的分布电容的大小、干扰源和感受器的阻抗及频率范围。干扰源频率越高, 产生的电容耦合干扰就越大。在射频电路中, 多根导线中的一根导线上, 其干扰可以耦合传输到其他所有的导线上。因此高频信号线都要加以屏蔽。在高频放大三极管的引脚之间最容易产生分布电容耦合, 应尽量缩短引脚的引线长度。

### 2. 磁场干扰

导体中流动的交流电流会产生磁场, 这个磁场将与临近的导体耦合, 在其上感应出电压, 如图 6-29 所示。两个电路之间有无直接连接对耦合没有影响, 并且无论两个电路对地是隔离还是连接的, 感应电压都是相同的。干扰电压正比于磁感应强度、互感、干扰源电流强度和磁场变化的频率。

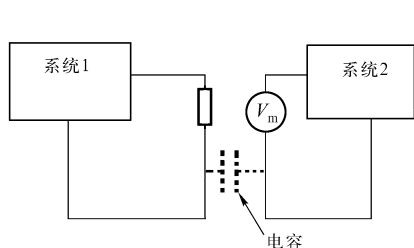


图 6-28 电场耦合

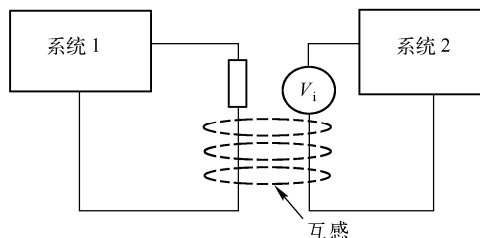


图 6-29 导线间互感电感耦合的模型

磁场耦合所引起的干扰, 即使在恒磁场和低频磁场下也会带来危害。如显像管、示波器在外界恒磁或低频磁场作用下, 会产生图像偏移或畸变。电感性耦合比较容易察觉, 当一个回路中流过变化电流时, 在它周围的空间就会产生变化的磁场, 这个变化磁场又在相邻回路中产生感应电压, 这样就把一个干扰电压耦合到接收电路中去了。

影响干扰耦合大小的因素有电流的频率、两导线间的距离以及并行在一起的公共走线长度。在干扰源电压一定的情况下, 干扰回路阻抗越小, 干扰电流就越大, 磁场也越大, 于是电感耦合就越强。因此电感耦合也称磁场耦合。

### 3. 电磁场干扰

在远场区, 辐射传播是导体干扰源将能量以电磁波的形式向周围空间射出。这个导体可以是一根信号线、一根电源线, 甚至是一根接地引线, 而对于无线电发射装置来说, 则是专门设计的各种天线。

#### (1) 传播原理

一根导线流过高频干扰电流, 它的周围空间产生交变的电场和磁场, 如图 6-30 所示。

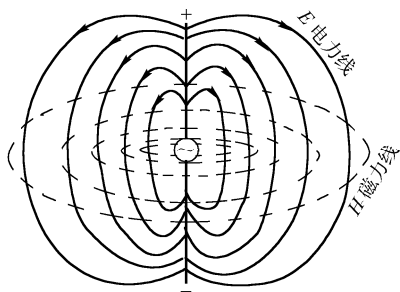


图 6-30 高频干扰电流周围的电磁场



当正电荷出现在导体上方，负电荷在下方，而且逐渐增大时，干扰电场随之增强，电力线增多。因干扰电流增大，周围的磁场亦加强。当干扰电流方向改变时，首先干扰电流减小到零，电磁场亦随之消失，然后在反方向增大，再在相反方向上建立电场和磁场。如果干扰电流的变化频率比较低，则在方向转换过程中，存在着足够长的时间，使实际储存在电磁场中的能量返回到电路中去，因此只发生微辐射。如果干扰电流频率很高，则在电磁场中的干扰能量还没有来得及返回电路之前，导线附近已产生新的方向相反的电磁场，把先前的电磁场推向空间，如此反复变化，波动向前传播干扰。

图 6-31 中用电场的变化描绘了干扰电磁波形成的过程。图 (a) 表示电力线方向向下的干扰电场达最大的情况。图 (b) 表示当干扰电流趋于零时，正负电荷向中心移动中和，中心部位的电力线收缩闭合消失。由于干扰电场变化速度很快，其余的电力线没有足够的时间返回电路中去，它们自身闭合在空间形成一个环形继续存在，如图 (c) 所示。相反方向的干扰电场很快建立起来，并把以前留下的闭合环推向远处，如图 (d)、(e) 所示，接着又在相反极性下重复图 (a) ~ (e) 的过程，正好完成一个循环周期。并以干扰电流的频率重复进行，干扰电磁场就以光速向外传播。

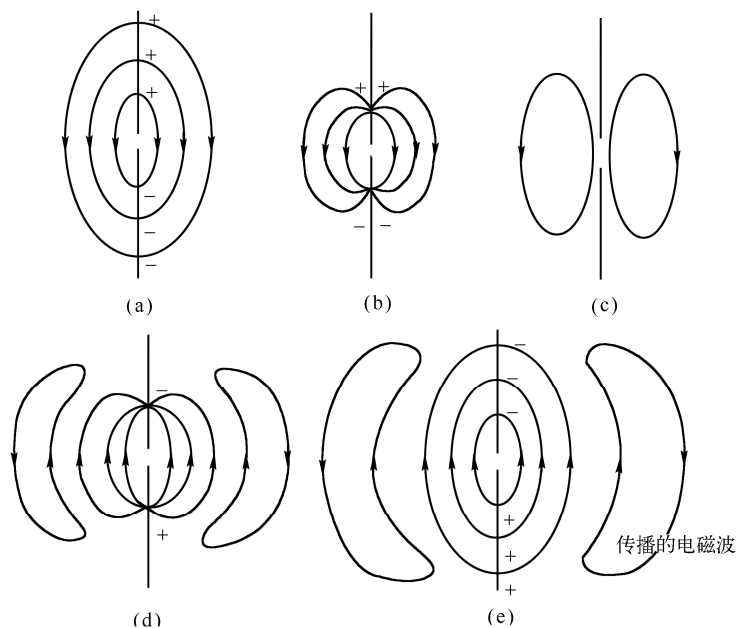


图 6-31 干扰电磁波辐射的过程

虽然图 6-31 描绘了干扰电场的辐射情况，根据麦克斯韦方程，可以想象同时也存在相关的干扰磁场的辐射情况，磁力线则是由环绕导线的同心圆所组成。因此干扰电磁场的传播是以电场和磁场的相互转化快速向远处发射的。

## (2) 耦合方式

任何干扰必须使电磁能量进入接收电路才能产生危害，那么，干扰电磁波是怎样进入接收电路的呢？这就是辐射的耦合问题。实际的辐射干扰大多数是通过导线电缆感应，然后沿导线进入接收电路的；也有一部分是通过电路的连接回路感应形成干扰的，还有通过接收机的天线感应进入接收电路的。因此，辐射干扰通常存在三种主要耦合途径：天线耦合、导线感应耦合和闭合回路耦合。

① 天线耦合。天线耦合就是经过天线将干扰电磁波接收。对于有意接收无线电信号的接收

机（如收音机、电视机，手持无线电话等）都是通过天线耦合方式获得所需的电信号的。天线耦合实质上就是电磁波在导体中的感应。

天线是一种经过精心设计的具有高灵敏度的导体结构，因而具有很好的接收效果。然而在电子设备和系统中还存在着无意的天线耦合，例如修理收音机时，若将起子触及高频接收电路，扬声器里会发出连续的声响，这是由于起子相当于一根天线，由其耦合作用而引起声响。

因此，在电子设备防干扰工程中对于无意的天线耦合必须给予足够的重视，因为这种耦合“天线”往往很难被发现，然而它却给高灵敏度电子设备和通信设备带来许多电磁干扰麻烦。

② 场对导线的感应耦合。一般设备的电缆线是由信号回路的连接线以及电源回的供电线、地线捆绑在一起构成的，每一根导线都由输入端阻抗和输出端阻抗以及返回线构成一个回路，因此，设备电缆线是设备内部电路暴露在机箱外面的部分，辐射场的耦合会沿导线进入设备形成辐射干扰，如图 6-32 所示。

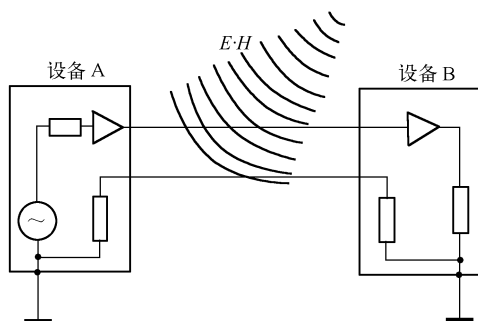


图 6-32 场对导线的感应耦合

③ 闭合回路耦合。图 6-33 为按正弦变化的电磁场在闭合回路中的感应耦合。导线所在闭合回路的感应电压与该处场强成正比，与闭合回路所围的面积成正比，还与电磁场的频率成正比。这个结论提醒人们在设计印制电路板布线时，应该尽量减小闭合回路导线所围的面积，以降低高频辐射场的耦合。

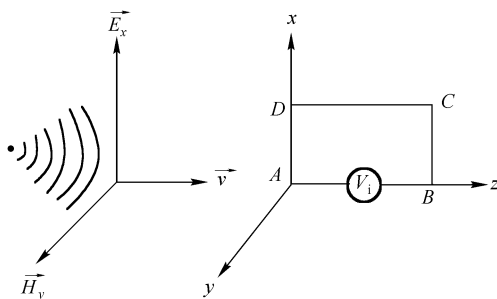


图 6-33 闭合回路耦合

## 第 7 章 电子设备干扰防护基础

### 7.1 概 述

#### 7.1.1 电子设备干扰防护历程

##### 7.1.1.1 世界范围内的发展历程

在世界范围内，研究电磁干扰这一传统问题的历史可上溯至 19 世纪。下面以时间顺序透视其发展的概况。

1823 年，安培发表了电流产生磁力的基本定律。1831 年，法拉第发现电磁感应现象，总结出电磁感应定律，揭示了变化的磁场在导线中产生感应电动势的规律。1840 年，美国人亨利成功地获得了高频电磁振荡。1864 年，麦克斯韦综合了电磁感应定律和安培全电流定律，总结出麦克斯韦方程，提出了位移电流的理论，全面地论述了电和磁的相互作用并预言电磁波的存在。麦克斯韦的电磁场理论为认识和研究电磁干扰现象奠定了理论基础。1866 年，世界上第一台发电机发电。从此，利用电磁效应工作的电气设备越来越多，同时也产生了越来越多有害的电磁干扰。在不知不觉当中，人类所处的电磁环境产生了巨大的变化，人为产生的电磁能量与日俱增，造成了电磁环境的污染。

1881 年，英国科学家希维赛德发表了“论干扰”的文章，标志着研究电子设备防干扰问题的开端。最早发现的电磁干扰现象是单线电报间的串音，但这类干扰现象在当时并未引起重视，随着电气运输的出现，通信线与强电线之间的干扰问题日益严重。于是，在跨越大西洋的几个欧洲国家，涉及无线电干扰各个方面的技术论文开始陆续出现，这些论文不仅研究无线电传输的电磁干扰，而且研究无线电接收的干扰。

1886 年 10 月，德国物理学家赫兹用放电线圈做火花放电实验，偶然发现和放电线圈靠得很近的另一个开口的绝缘线圈中有电火花跳过。赫兹十分敏感，开始有计划地进行这方面的研究。在 1 年多的时间里，他反复改变导体（天线锥形）的形状、大小、介质的种类、放电线圈与感应线圈之间的距离，终于把电磁波辐射到自由空间，同时又成功地接收到电磁波，用实验证实了电磁波的存在，从此开始了对电磁干扰问题的实验研究。后来，赫兹研究了紫外光对火花放电的影响，发现了光电效应，也就是物质在光的照射下释放出电子的现象。这一发现，成了爱因斯坦建立光量子理论的实验基础。赫兹还通过实验确认电磁波是横波，具有直线传播、反射、折射和偏振等光学性质，并且实现了两列电磁波的干涉，从而全面验证了麦克斯韦的光电磁理论的正确性，进一步完善了麦克斯韦方程组，使它更加优美、对称，得出了麦克斯韦方程组的现代形式。赫兹对人类文明作出了很大贡献，1894 年元旦因中毒而去世，年仅 36 岁。后人为了表彰他的功绩，用他的名字来命名各种波动频率的单位。

1887 年，柏林电气协会成立了“全部干扰问题委员会”，成员有赫兹和西门子等。1889 年，

英国邮电部门研究了通信中的干扰问题，于是，干扰问题开始走向工程化和产业化。

1933 年，国际无线电干扰特别委员会 CISPR (The International Special Committee on Radio Interference) 成立。CISPR 的第一次会议于 1934 年 6 月 28 日至 30 日在法国巴黎召开。

1934 年，英国人详细分析了 1 000 多个与无线电干扰相关的案例所产生的故障，发现这些无线电干扰来自电动机、开关和汽车点火装置的运行，并观察了来自电力牵引和电力输电线的干扰。

在 20 世纪 40 年代初提出了电磁兼容性 (EMC) 的概念。从此，电磁干扰问题便由单纯的排除干扰逐步发展成为从理论上、技术上全面控制用电设备在其电磁环境中正常工作的系统工程。

第二次世界大战期间，军方对使用电信和雷达设备有广泛兴趣，并对无线电干扰以及比正常无线电广播频率更高的频段产生了兴趣。在此阶段，除了研究感性、容性及阻性等耦合方式引起的干扰外，人们还对辐射性干扰进行了大量研究，有关射频干扰的专门刊物《Radio Frequency Interference》就曾经报道了不少科研成果，直到 1964 年，专刊业务范围不断扩大，改名为 EMC 专刊，并沿用至今。

第二次世界大战后期，美国联邦通信委员会 FCC (The Federal Communications Commission) 和英国标准化学会 BSI (The British Standards Institution) 这样的国家制定规章的机构，开始颁布试用他们各自国家的干扰控制极限。1948 年，前苏联制定了《工业无线电干扰的极限允许值标准》并颁布施行。

20 世纪 60 年代后，在所有这些技术领域内，电磁噪声和克服电磁干扰产生的问题引起人们的高度重视，导致了电磁噪声领域世界范围内的许多技术研究。较大规模的国际性电子设备防干扰学术会议，每年召开一次。

欧洲电气产品标准委员会于 1973 年成立，该委员会负责制定设备的电磁噪声和执行极限的已协调的欧洲标准，这些标准涉及无线电接收机、电视机、信息技术设备、工业、科学和医疗设备，等等。

20 世纪 80 年代，数字技术在工业自动化方面的应用影响了与电磁噪声相关问题的研究。美国的 FCC、德国的 FTZ (Fernmelde Technisches Zentralamt)、英国的 BSI、日本的 VCCI (Voluntary Control Council for Interference) 和其他国家的类似协会，颁布了控制电磁噪声发射和抗扰性技术要求的执行标准。政府内的专门机构，诸如美国的 NASA (The National Aeronautics and Space Administration, 国家航空和航天管理局)、NTIA (The National Telecommunication and Information Agency, 国家电信和情报局) 以及其他国家的类似组织，发布了控制电磁辐射和电磁抗扰性的执行标准。诸如 ICAO (The International Civil Aviation Organisation, 国际民用航空组织)、IMCO (The International Maritime Consultative Organization, 国际海事协商组织) 这样一些国际组织，也把注意力集中于电磁噪声和电磁噪声允许的极限方面。

20 世纪 90 年代，美国、德国、日本、前苏联、法国等经济发达国家在电子设备防干扰研究和应用方面达到了很高的水平。防干扰设计成为民用电子设备和军用武器装备研制中必须严格遵循的原则和步骤。在产品的设计、加工、检测、试验和使用的各个阶段都要考虑防干扰技术和管理。电磁兼容性成为产品可靠性保证中的重要组成部分。

与此同时，电子设备防干扰达标认证已由一个国家范围发展到一个地区或一个贸易联盟采取统一行动。从 1996 年 1 月 1 日开始，欧洲共同体 12 个国家和欧洲自由贸易联盟的北欧 6 国共同宣布实行电磁兼容性许可证制度，使电子产品防干扰认证与安全性认证处于同等重要的地位。

21 世纪，电子设备防干扰工程已经从事后检测处理发展到预先分析评估、预先检验、预先设

计。电子设备防干扰技术已成为现代工业生产并行工程系统的实施项目组成部分。

### 7.1.1.2 中国国内的发展概况

我国由于过去的工业基础比较薄弱,电磁环境危害尚未充分暴露,对电子设备防干扰的认识比较欠缺。因此,对防干扰理论和技术的研究起步较晚,与国际间的差距较大。我国第一个防干扰标准是1966年由原第一机械工业部制定的部级标准JB—854—66《船用电气设备工业无线电干扰端子电压测量方法与允许值》。直到20世纪80年代初,才有组织、系统地研究并制定国家级和行业级的电子设备防干扰标准和规范。1981年颁布了第一个较为完整的标准HB5662-81,即《飞机设备电磁兼容性要求和测试方法》。此后,在标准和规范的研究与制定方面有了较大进展。

20世纪80年代以来,国内电子设备防干扰学术组织纷纷成立,学术活动频繁开展。1984年,中国通信学会、中国电子学会、中国铁道学会和中国电机工程学会在重庆召开了第一届全国性电子设备防干扰学术会议。1992年5月,中国电子学会和中国通信学会在北京成功地举办了“第一届北京国际电磁兼容学术会议”。随着国民经济和高新科技产业的迅速发展,在航空、航天、通信、电子、军工等部门,电子设备防干扰技术受到格外重视,并投入了较大的财力和人力,建立了一批试验和测试中心,引进了许多现代化的电磁干扰和敏感度自动测试系统和试验设备。一些军工部门、企业、研究所及大学陆续建立了实验研究室,电子设备研究、设计及制造单位也都纷纷配备了防干扰设计、测试人员,电子设备防干扰工程设计和预测分析在实际的科研工作中得到了长足的发展。

电磁污染作为环境污染的一种,其危害性已日益引起我国政府的重视。国家环境保护局针对信息传递中的电磁波发射,工业、科学、医疗应用中的电磁辐射,高压送变电中产生的电磁辐射,于1997年3月25日发布实施《电磁辐射环境保护管理办法》。国家出入境检验检疫局的1998年122号文件颁布了“关于对六种进口商品实施电磁兼容强制检测的通知”,规定对计算机、显示器、打印机、开关电源、电视机、音响设备六种进口商品,自1999年1月1日起强制执行电磁兼容检测。1999年,国家质量监督局发布了《EMC认证管理办法》。

现在,我国已将产品的电磁兼容性要求纳入了国家强制性俗称“3C”的电子产品认证范围,国家规定从2003年5月1日起凡列入国家强制性产品认证目录的产品未经认证不得出厂、进口和销售,从而保证电子产品的质量和提高其市场竞争力。

## 7.1.2 电子设备干扰防护的内涵

### 7.1.2.1 电子设备干扰防护的研究内容

#### (1) 电磁干扰特性及其传播耦合理论

人们为了抑制电磁干扰,首先必须了解电磁干扰的特性和它的传播机理。对于电磁干扰源的研究,包括电磁干扰源的频域和时域特性、产生的机理以及抑制措施等;对于电磁干扰传输特性的研究,包括对传导和辐射特性的研究。例如,根据干扰信号的频谱特性可以了解它是宽带还是窄带干扰;根据干扰信号的时间特性可知其为连续波、间歇波,还是瞬态波,以便采取不同的措施加以抑制。

#### (2) 电磁危害及电磁频谱的利用和管理

人为的电磁污染已成为人类社会发展的最大公害。电磁危害主要表现为射频辐射、核电磁脉冲放电和静电放电对人体健康的危害;对电引爆装置和燃油系统的破坏、对电子元器件及其电路

功能的损害等。

在关注电磁能危害的同时，人们还清醒地认识到人为的电磁频谱污染问题已经相当严重。电磁频谱是不可见的，是一个有限的资源，当前在全球范围内被占用的频谱范围和数量日益扩张，频谱利用方法的进展远慢于频谱需求的增加。对此，联合国及各国政府均建立了专门机构，进行科学的频谱分配与管理，并对各种电子设备产生的辐射杂波加以严格限制，从而确保良好的电磁环境。在中国境内，中国无线电管理委员会负责分配和协调无线电频段。

### （3）电磁耦合的工程分析和防干扰控制技术

在实际工程中，电磁干扰的传播和耦合很少以单一形态发生，而是多种耦合特性的组合，表现为综合性耦合模式，例如，两根平行导线间的电磁耦合实质是电容性耦合和电感性耦合的综合；电磁场对导线感应耦合并传输到导线终端的耦合模式，实际上是空间辐射耦合和传输线传送两种基本形态的组合。这些典型的耦合模式在实际工程分析中通常作为一种固定的工程模式直接用于分析更复杂的电磁干扰问题，从而使电子设备防干扰工程分析的理论更加成熟。因此，分析和研究典型耦合模式有助于快速识别干扰机理。

工程实践中广泛采用的滤波、屏蔽、接地、搭接和合理布局等抑制电磁干扰的技术措施都是有效的。但是随着设备和系统的集成化、数字化和处理信息的高速化，以上措施的采用往往会与成本、质量、功能要求产生矛盾，必须权衡利弊研究出最合理的措施来满足防干扰要求。另外，新材料及新工艺的出现，使电子设备防干扰控制技术不断向前发展、新的抑制电磁干扰的措施不断涌现。

### （4）防干扰设计理论和方法

任何一项工程设计，最主要是对费效比的考虑，也是电子设备防干扰设计的一项重要指标。在一个产品从设计到投产的过程中，可以分为设计、试制和投产三个阶段，若在产品设计的初始阶段解决电磁干扰问题，花钱最少，控制干扰的措施最容易实现。如果等到产品投产后发现干扰问题再去解决它，成本就会大大上升。因此，费效比的综合分析是电子设备防干扰设计研究的一部分。

电子设备防干扰设计是在功能设计方案基础上进行的，防干扰工程师必须和系统工程师密切配合，反复协调，把防干扰设计作为系统设计的一部分。

### （5）防干扰测量和试验技术

电子设备防干扰测量和试验研究是至关重要的，它贯穿于系统分析、建模、产品开发、产品检验、干扰诊断等各个阶段。为了对设备进行敏感度测量，需要研制多种模拟信号源及其装置来模拟产生传导和辐射干扰信号，因此推动了试验装置的研究开发，促进了测量和试验设备的自动化程度不断提高。高精度的电磁干扰及电磁敏感度自动测量系统的研制、开发并应用于工程试验，是电子设备防干扰学科研究的重要内容。

### （6）防干扰预测和分析

防干扰预测和分析是进行合理设计的基础。在设备和系统设计的最初阶段就进行防干扰分析和预测，能够对潜在电磁干扰进行定量的估计和模拟，避免采取过高的抑制措施，造成不必要的浪费；同时也可以避免设备和系统建成后才发现干扰的难题。

电子设备防干扰预测一般在三个级别上进行。第一是芯片等元器件级的防干扰预测，当芯片工作在高频时，干扰问题十分突出。第二是部件级的防干扰预测，例如印制电路板、多芯线、驱动器等电子部件本身以及部件与部件之间的防干扰预测。第三是系统级的防干扰预测，例如对飞机、舰船、导弹、飞船等装有多种复杂电子设备的系统进行防干扰预测。

防干扰预测和分析的方法是采用计算机数字仿真技术,将各种电磁干扰特性、传输函数和电磁敏感度特性全部用数学模型描述并编制成计算机程序,然后根据预测对象的具体状态,运行预测程序以便获得潜在的电磁干扰预测结果。目前,这种预测方法在世界许多发达国家已普遍采用。

#### (7) 防干扰标准、规范与工程管理

防干扰标准、规范是电子设备防干扰设计和试验的主要依据。通过制定规范和标准来控制用电设备和系统的电磁发射和电磁敏感度,从而使系统和设备相互干扰的可能性大大下降,达到防患于未然的目的。标准规定的测试方法和极限值必须要恰到好处,以便符合国家经济发展综合实力和工业发展水平,否则会造成人力、物力和时间的浪费。为此,制定标准时必须进行大量的实验和数据分析研究。

为保证设备和系统在全寿命期内有效而经济地实现防干扰要求,必须实施防干扰管理。防干扰管理要有全面的计划,从工程管理的高层次抓起,建立工程管理协调网络和工作程序,确立各个研制阶段的防干扰目标,突出重点,加强评审,提高工作的有效性。

#### (8) 信息设备电磁泄漏及其防护

当计算机或其他信息电子设备工作时,机密信息可通过设备泄漏的电磁场以辐射方式发射出去,也可能通过电源线、地线、信号线等以传导方式耦合出去。因此,在一定距离内,往往不需要采用特殊设备,便可以清晰、稳定地接收到这些信息设备所发射信息的内容,造成机要信息严重泄漏。如何解决信息设备的电磁泄漏问题,目前已成为一项专门技术,这项技术称为防电磁泄漏技术,即所谓的TEMPEST技术,TEMPEST是Transient Electromagnetic Pulse Emanation Standard(瞬态电磁脉冲发射标准)的缩写。TEMPEST技术的任务是检测、评价和控制那些危及工作任务安全的信息设备的非功能性传导发射和辐射发射,以防止窃听机要信息的危险。

#### (9) 环境电磁脉冲及其防护

电磁脉冲(EMP)可分为两类:一类为环境电磁脉冲,主要由核爆炸产生,因此又称为核电磁脉冲(NEMP)。核爆炸瞬间,弹体释放出大量高能 $\gamma$ 射线、X射线和高能中子,由于这些射线能量很大,使周围空气分子电离,产生大量带电粒子,这些粒子的运动形成电流,使爆心周围产生一个很强的瞬时电磁场,它以波的形式向外传播,这就是核爆炸电磁脉冲。

另一类是系统电磁脉冲。主要由 $\gamma$ 射线或X射线直接打在设备壳体上激发产生电磁脉冲。电磁脉冲是十分严重的电磁干扰源。其频谱覆盖范围很宽,可以从甚低频到几百兆赫;场强很大,电场强度可达40kV/m或更高;作用范围很广,可达数千千米。不论是架空天线、输电线、电缆线、各种屏蔽壳体等都会被它感应产生强大的脉冲射频电流,这种脉冲电流如果进入设备内部将产生严重的干扰,甚至使设备遭到破坏。电磁脉冲对于卫星、航天飞机、宇宙飞船、导弹武器、雷达、广播通信、电力、电子、仪器设备等系统都有严重影响。近年来电磁脉冲干扰及其防护已被作为电子设备防干扰学科的一个重要研究内容。

### 7.1.2.2 电子设备干扰防护的意义和特点

#### (1) 为了电子设备工作的可靠性

设备的小型化使干扰源与敏感器件靠得很近。这使传播路径缩短,增加了干扰的机会。器件的小型化增加了它们对干扰的敏感度。由于设备越来越小并且便于携带,像汽车电话、膝上计算机等设备随处可用,而不一定局限于办公室那样的受控环境。这也带来了兼容性问题。例如,许多汽车装有包括防抱死控制系统在内的大量的电子电路,如果汽车电话与这个控制系统不兼容,则会引起误动作。有时,电磁干扰不仅影响电子设备的正常工作,甚至造成电子设备中的某些元

器件损害。

元器件互连技术的发展降低了电磁干扰的阈值。一般来说,高速数字电路比传统的模拟电路产生更多的干扰。

传统上,电子线路装在金属盒内,这种金属盒能够通过切断电磁能量的穿插路径来提供屏蔽作用。现在,为了减轻重量、降低成本,越来越多地采用塑料机箱。塑料机箱对与电磁干扰是透明的,因而使敏感器件处于无保护的状态。

在竞争日益激烈的工业中,可靠性已经成为电子设备的一个重要市场特征。自动化设备,特别是医疗设备,必须连续工作,这时设备内的 EMI 屏蔽技术提高了设备的可靠性。因此,对电子设备的防干扰技术要给予充分的重视。既要注意电子设备不受周围电磁干扰而能正常工作,又要注意电子设备本身不对周围其他设备产生电磁干扰,影响其他设备正常运行。

#### (2) 为了电子设备的国际接轨

电子设备防干扰达标认证已由一个国家范围向地区和全球发展,使电磁兼容性与安全性、环境适应性处于同等重要的地位。

#### (3) 为了人身和某些特殊材料的安全

现在,人们越来越开始注意各种辐射对健康的影响。电磁能量通过对人体组织的物理化学作用会产生有害的生理效应。过量的 X 射线和紫外线照射的危害已经被充分证明了。现在讨论的焦点是微波和射频显示单元产生的辐射对妇女健康的伤害,因为已经有充分的证据说明在高压线附近生活会患疾病。

电磁波通过与电爆装置的控制电路感应耦合,形成的干扰电流可能引起电爆装置的爆炸。因此, GJB786 中规定,电引爆器导线上的电磁干扰感应电流和电压必须小于最大不发火电流和电压的 15%。另外,各种燃油在强电磁场的作用下(直接照射、电火花、静电放电)有发生燃烧和爆炸的危险;因此,为了人身和某些特殊材料的安全, GJB786 中还规定,电子设备的电磁辐射量连续波的平均功率密度不允许超  $4\text{mW}/\text{cm}^2$ , 脉冲波的平均功率密度不允许超过  $2\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

#### (4) 为了重要信息的保密

随着网络通信、卫星通信、移动通信和个人通信等现代化通信技术的崛起和飞速发展,信息泄露及其给信息安全带来的隐患愈来愈受到人们的关注。信息安全关系到一个国家、一个民族的盛衰兴亡。

目前许多信息都离不开计算机和网络。但这些设备在输入、输出、加工处理信息过程中,必然会产生电磁辐射。在离工作间几十米甚至上百米处就可测到计算机等设备的工作状况。收集到的电磁辐射信号,通过专用仪器就能还原成正在处理的信息和显示装置上正在显示的内容。

#### (5) 为了当今和未来战争的需要

核爆炸时产生的电磁脉冲,以光速向外辐射传播,其电场强度可达  $10^5\text{V}/\text{m}$  级,磁场强度可达  $260\text{A}/\text{m}$ , 脉冲宽度为  $20\text{ns}$  量级,电磁脉冲峰值处频率为  $10^5\text{Hz}$ 。这种电磁脉冲作用于电子设备时,轻者造成电子设备性能恶化,重者造成电路元器件损坏。

特别是在当今和未来战争中,已经应用的电磁脉冲弹和正在研制的高功率微波武器都具有类似核爆炸时产生的电磁脉冲辐射,将对电子设备构成致命威胁。而电子设备防干扰技术可以为对抗这种威胁提供基本技术指导。

### 7.1.2.3 电子设备防干扰的学科特点

电子设备防干扰学科是一门新兴的综合性交叉学科,其主要的特点有以下几个方面。



### (1) 学科体系以电磁场理论为基础

分析电磁干扰源的干扰特性、预测其对敏感设备的潜在威胁和探索控制干扰的措施都要采用电磁场理论的方法和结论。各种仿真、测量和试验、电磁干扰的数值分析方法在防干扰工程中的广泛应用也离不开电磁场理论的支持。

### (2) 是一门新兴的综合性交叉学科

电子设备防干扰学科与很多学科互相渗透、结合。它不仅直接应用和涉及数学、电磁场理论、电工原理、电子技术、通信理论、材料科学、计算机与控制理论、核物理学、电磁测量、信号分析、自动控制、生物医学、材料及工艺、机械结构等知识,而且与舰船、飞机、卫星、雷达、广播通信、导弹武器、车辆、宇宙飞船、电力和电子仪器等密切相关。它是在无线电抗干扰技术的基础上,经过扩展、延伸和系统化所形成的一门新兴学科,也是电力、电子和其他相关专业工程师必须掌握的基础知识和技术。

### (3) 计量的单位具有特殊性

在电子设备防干扰领域,无论是标准、规范,还是测量、试验方法,广泛采用 dB 作单位,如采用 dBW、dBV、dBA 作单位依次表示功率、电压、电流的相对大小。

### (4) 大量引用无线电术语

电磁干扰起初仅在无线电技术中显得较为突出,然而随着半导体微电子技术的迅猛发展及电子技术的广泛应用,使防干扰从无线电抗干扰技术的基础上延伸到所有用电设备和系统,从而确立了电子设备防干扰学科的公共技术基础地位。在学科的形成和发展过程中,大量沿袭了无线电技术的概念和术语,例如,有时把导线之间的电磁相互耦合称为“串音”;时变电磁场在导线上产生的响应称为“电磁场激励”等。

### (5) 具备极强的实用性

电子设备防干扰是一门实用性极强的学科。它起源于解决实际无线电干扰问题,又在处理用电设备或系统的防干扰过程中获得发展。随着信息处理的高速化、电子设备的数字化、小型化和设备构件的非金属化使电子设备或系统的抗干扰能力不断降低。为什么会产生这样的效应呢?第一,现代数字逻辑和信号处理与基于电的旧技术相比有低的门限电压,抗扰性较差;第二,在追求高处理速度的过程中,使用了较短的脉冲上升时间,根据辐射机理这种脉冲具有长距离的传播能力;第三,现代电子设备的外壳设计更多地使用塑料而非金属,显然,与全金属机箱相比就大大降低了其固有的电磁屏蔽能力;第四,小型化以及由此而引起的密集设计的趋势使各个元件、器件、组件、连接线等的空间布局缩小,所以也带来了防干扰问题。

### (6) 强烈依赖测量技术

电子设备防干扰学科所面对的研究对象,无论其频域特性还是时域特性都十分复杂。研究对象的频率范围非常宽,使电路中的集中参数与分布参数同时存在,近场与远场同时存在,传导与辐射同时存在。所以,在观察与判断物理现象或解决实际问题时,实验与测量具有重要的意义。

在电子设备设计和试制阶段,必须进行防干扰测量。这种诊断性的测量有助于识别潜在的干扰问题范围,有助于测试各种补救方法的有效性。产品完成制造后,必须依据防干扰标准进行严格的试验测量,确保设备或系统在规定的电磁环境中可靠、安全地运行。

#### 7.1.2.4 防干扰设计的主要内容

电子设备防干扰设计一般分为五个级别:电路组件级设计、设备级设计、分系统级设计、系统级设计和系统间级设计,其内容主要有以下几方面。

### (1) 分析系统所处的电磁环境

通过分析电磁环境,找出周围可能潜在的人为干扰源和自然干扰源,确定指定频率范围内可能产生的干扰电平。在此基础上精心选择设备的工作频谱、频率及频带宽度,既要尽量避免系统内部相互干扰,也要遵循频谱管理及控制准则与规定。

### (2) 制定防干扰大纲

为保证系统内及系统间的电磁兼容,必须制定防干扰大纲和控制计划;制定防干扰试验计划。电子设备防干扰设计的基本参数主要有电磁敏感阈值、敏感度门限值、干扰允许值、电磁发射限值、失效干扰电平等。

### (3) 确定降额准则和安全裕度

在保证系统完成功能的前提下,确定分系统和设备的性能降额准则以及关键分系统和设备的裕度。防干扰安全裕度是衡量系统、分系统及设备的电磁兼容性程度的参数。安全裕度定义为实际接受的电磁干扰值比设备或分系统敏感阈值所低的程度,表示为

$$m=s-p \quad (7-1)$$

式中  $m$  为安全裕度(dB);  $s$  为设备或分系统的敏感度阈值(dB);  $p$  为设备或分系统实际接受的电磁干扰电平值(dB)。

如果  $s>p$ 、 $m>0$ ,则设备或分系统处于兼容状态,通常规定安全裕度为 6dB;对于具有易爆危害的燃油及军械设备或分系统规定安全裕度为 20dB。

在安全裕度  $m$  有了明确的取值后,可以根据已知  $s$  和  $p$  中任一参数,设计计算另一个。

### (4) 优化信号设计

传输信息的电信号需占用一定的频谱。为尽量减小干扰,对有用信号应规定必要的最小占有带宽,这有赖于优化信号波形。就信号占有带宽而言,采用脉冲宽度大、上升时间慢的波形较好。

### (5) 完善线路设计

应设计和选用自身发射小、抗干扰能力强的电子线路(包括集成电路)作为电子设备的单元电路。对于一般小信号放大器应尽可能增大放大器的线性动态范围,以提高电路的过载能力,减少非线性失真。晶闸管和工作于开关状态的三极管,工作时均产生电流脉冲,发射频谱很宽的电磁能量,因而必须采取相应的抑制措施。

为了减小放大器因非线性失真而产生的谐波发射,可采用反馈和非线性补偿方法改善放大器的线性。采用平衡电路(如差分放大器)传输信号不但可减小共模电流产生的干扰,而且还能抑制共模干扰对放大器的影响。

### (6) 屏蔽

用屏蔽体将干扰源包封起来,可以防止干扰电磁场通过空间向外传播;反之,用屏蔽体将感受器包封,就可使感受器免受外界空间电磁场的影响。屏蔽技术虽能有效地阻断近场感应和远场辐射等电磁干扰的传播通道,但是它又可能使设备的通风散热困难、维修不便,并导致重量、体积和成本的增加。所以设计人员需权衡利弊,采用合理的措施,以最佳费效比来满足防干扰要求。

### (7) 接地与搭接

不管是否与大地有实际连接,只要为电源和信号电流提供了回路和基准电位,就通称为接地。电子设备接地是抑制噪声和防止干扰的重要措施之一。设计中如能周密设计地线系统,综合使用接地、滤波和屏蔽等措施,往往可事半功倍,有效地提高设备的电磁兼容性。事实证明,一个设备和分系统在联机时出现故障,多半是由接地系统不完善引起的。

### (8) 滤波

滤波是借助抑制元件将有用信号频谱以外不希望通过的能量加以抑制。它既可以抑制干扰源的发射,又可以抑制干扰源频谱分量对敏感设备、电路或元件的影响。滤波虽能十分有效地抑制传导干扰,但制造大容量、宽频带的抗电磁干扰滤波器的代价是昂贵的。

### (9) 合理布局

合理布局包括对总体布局的检验、电缆布线和分配、门窗孔缝的位置检验和印制板布局方位的检验等。其基本原则是使感受器和干扰源尽可能远离,输出与输入端口妥善分隔,高电平电缆及脉冲引线与低电平电缆分别敷设。通过合理布局能使相互干扰减小到最小程度而又费用不多。

## 7.1.2.5 防干扰设计的实施细则

### 1. 方案设计

(1) 明确所开发的设备或系统要满足的防干扰标准。有时,根据用户的要求或实际情况(例如,周围有高灵敏度的接收机,或产生强干扰的设备),需要提出项目专用的防干扰要求。

(2) 设计接口电路,尽量使用平衡接口电路,必要时,可以在接口电路上使用隔离变压器等提高抗共模干扰的能力。

(3) 电路中避免使用高速的脉冲信号,脉冲信号的上升/下降沿尽量平缓,模拟电路的带宽尽量窄(通过选择带宽适当的器件和加适当滤波电路来限制带宽)。

(4) 尽量使用大规模集成电路,这样可以获得很小的环路面积,提高抗扰性和减小发射。

(5) 确定系统内的关键电路部分,包括强干扰源电路、高度敏感电路,考虑对这些电路采取特殊的隔离措施(局部屏蔽、滤波)。

(6) 确定需要隔离的电路的隔离界面。隔离界面确定的原则是:穿过界面的信号线尽量少,并且频率尽量低(以便于采取滤波措施)。

(7) 根据系统的工作原理和地线设计的原则,画出系统的地线图(地线图上可以不标具体器件、电路,仅标出不同的电路模块),不同性质的电路用不同的地线,不同的地线用不同的符号来表示。

(8) 确定需要采取哪些干扰抑制措施,例如屏蔽、滤波等,需要的屏蔽效能和滤波性能(包括频率范围、衰减量等)。

(9) 电缆线分组,将信号线按照高频、低频、数字、模拟、电源等特性分组,不同组的信号不要安排在一根电缆内,否则不但容易造成相互干扰的问题,而且不利于采取滤波措施。

### 2. 结构设计

(1) 首先确定制造屏蔽机箱的材料,分析屏蔽效能的要求,看是否有低频磁场(1kHz以下)的屏蔽要求,如果没有,可以选择钢、铝、铜等常用的材料做屏蔽材料。如果有低频磁场的屏蔽要求,需要采用坡莫合金等高磁导率的材料。

(2) 如果使用高磁导率材料,是否有条件做热处理,恢复其由于加工而损失的磁导率。

(3) 确定机箱上需要低阻抗搭接的部位,例如屏蔽体的接缝、静电放电电流的路径、滤波器的接地、系统公共地线等。

(4) 低阻抗搭接的实现方法(保证必要的低阻抗),对于永久性连接,最理想的方法是焊接,对于长缝隙,要连续焊接(需要注意的是,连续焊接时会产生变形)。

(5) 非永久性搭接的处理方法,一般采用电磁密封衬垫,选用什么种类的电磁密封衬垫,综合考虑屏蔽效能、密封衬垫的安装方式、电化学相容性、价格等问题。

(6) 充分考虑电磁密封衬垫形成的反弹力造成面板的变形, 面板的刚度要足够。

(7) 在恶劣环境(潮湿、盐雾等环境)中使用, 或衬垫材料与屏蔽基体材料电化学不相容时, 用适当的环境密封措施, 隔绝潮气。

(8) 进出屏蔽机箱的电缆是否采取了措施, 例如屏蔽或滤波。屏蔽一般对频率较低的干扰作用较好, 高频时的效果取决于屏蔽电缆的结构和屏蔽层的接地方式。

(9) 对于传输频率较低的信号的电缆, 或一端没有屏蔽体的屏蔽电缆(如连接传感器的电缆), 在电缆端口处采取滤波是最好的解决方案。

(10) 滤波器的安装方式是否正确, 是否解决了滤波器良好接地、滤波器与电缆入口之间的导线过长等问题。

(11) 如果使用了滤波连接器或滤波阵列板, 在滤波连接器或滤波阵列板与机箱之间要安装电磁密封衬垫。

(12) 电源线滤波器的外壳要直接搭接在金属机箱上, 电源进线要尽量短。

(13) 机箱上的缝隙或孔洞尽量远离强辐射源或敏感电路。

(14) 机箱上不能有任何金属物体直接穿过机箱。

(15) 通风口上如果使用蜂窝板, 蜂窝板与机箱之间必须使用电磁密封衬垫。

(16) 显示窗口的处理, 如果使用屏蔽玻璃, 在屏蔽玻璃与机箱之间必须使用电磁密封衬垫。

(17) 针对设备上所有会受到静电放电的部位, 根据电流从阻抗最小的路径流过的原则, 预测出一条电流泄放路径, 然后分析静电放电路径上或附近是否有敏感电路。

(18) 对静电放电路径附近的敏感电路进行电磁屏蔽, 屏蔽层接到电路地上。

(19) 如果所采用的是非屏蔽机箱, 要在电缆的入口处设置一块较大的金属板, 为电缆接口处的滤波、电缆屏蔽层端接提供条件。

### 3. 电路与线路板设计

(1) 线路板层数的确定, 综合考虑电磁兼容性要求和成本。成本允许时, 尽量使用四层以上的线路板, 设置一层地线面。

(2) 充分考虑器件的位置和方向。

(3) 避免时钟谐波重合, 对每个时钟信号作一张谐波表。

(4) 对于多层线路板, 要使高速信号、高敏感信号与地线层相邻布置。

(5) 按照电路的工作频率、电平大小、数字电路、模拟电路划分, 将不同性质的电路分别布置在线路板的不同区域, 使干扰电路与敏感电路远离。

(6) 不同区域的电路(对应不同性质的电路)使用不同的地线和电源, 不同的地线和电源在一点连接起来。

(7) 对于多层线路板, 不同区域的地线面在边缘处要满足“ $20H$  法则”, 即地线面的边沿要比电源层或信号线层的边沿外延出  $20H$ ,  $H$  是地线面与信号线层之间的高度。

(8) 对于专门设置地线面的多层线路板, 要避免地线面上有长缝隙(不包括为了分割不同地线而有意设置的缝隙)。

(9) 时钟信号的回路面积必须尽量小。

(10) 在关键信号线(高频或特敏感的信号)的附近设置信号地线。

(11) 如果采用双层线路板, 必须设置地线网格(A 面打上横线, B 面打上竖线, 在两者相交处通过金属化过孔将两者连接起来, 作为地线使用)。

(12) 高速时钟线要尽量短, 并且不要换层布线, 不要  $90^\circ$  拐角, 以避免阻抗发生突变, 造

成信号反射。

(13) 高速时钟电路尽量远离 I/O 端口, 以防止高频信号耦合到电缆上, 借助电缆产生共模辐射。

(14) 在 I/O 区域将逻辑地与机壳以非常低的阻抗连接起来, 这点非常关键。

(15) I/O 接口上使用独立的地线, 这块独立的地线与线路板上的其他部分地线仅通过一点连接, 这块地线专门为滤波和屏蔽层提供干净地。

(16) 安装在线路板上的 I/O 接口滤波器, 要尽量靠近电缆进出口, 使滤波器与电缆连接器之间(屏蔽机箱之间)的连线最短。

(17) I/O 接口电缆的驱动电路要靠近机箱上的连接器。

(18) 对所有 I/O 电缆进行共模滤波, 将所有 I/O 电缆集中在线路板的设定 I/O 区域。

(19) 作为 I/O 接口滤波的旁路电容与机壳之间的连接必须阻抗很低。

(20) 芯片上安装的散热片要多点接到信号地上。

(21) 线路板上的局部屏蔽必须选择走线最少的界面, 并对所有穿过屏蔽盒的走线滤波。

(22) 电源解耦电容的容量尽量小, 与芯片电源引脚和地线引脚之间的引线尽量短。

(23) 板卡(上面有高频噪声器件或外拖电缆)必须与母板的地或机壳妥善(不能依靠连接器内的接地插针)连接起来。条件允许时, 对线路板上的器件进行屏蔽, 注意穿过屏蔽界面的导线必须滤波。

#### 4. 电缆设计

(1) 扁平电缆尽量在每根信号线旁边配一根地线, 条件不允许时, 每两根信号线配一根地线。

(2) 情况允许时, 使用双绞线, 但使用双绞线时, 注意两端电路的接地, 不要形成较大的地线环路。

(3) 使用同轴电缆时, 注意外层的端接和两端电路的接地, 不要形成除了外层以外的第二条回流路径。

(4) 电缆远离屏蔽体上的缝隙、开口。

(5) 设备外部电缆的屏蔽层与屏蔽机箱要 360° 低阻抗搭接。

(6) 电缆上安装铁氧体磁环, 根据需要调整绕在铁氧体磁环上的导线的匝数。

(7) 尽量不将性质不同的信号线安排一个连接器或电缆中。

### 7.1.3 电子设备防干扰相关机构

#### 7.1.3.1 国际性研究机构

##### 1. 国际电工技术委员会(IEC)

###### (1) 概况

国际电工技术委员会是 1906 年在伦敦创建的, 当时有 13 个国家的代表参加。IEC 是研究电工程学科标准化的第一个国际组织, 目的是促进电工和电子工程领域内标准化和相关事宜的所有问题方面进行国际协作。任何独立国家都可以成为该委员会成员。现在 IEC 已有 53 个会员国, 代表了世界 80% 的人口, 是联合国经济和社会理事会的顾问。

实际的技术工作和标准化工作由许多技术委员会来执行, 在经执行委员会批准的专业领域的总布局范围内, 它们决定每个研究课题、指导工作和起草建议书。这些建议书经过各会员国表决批准后, 将会发表在 IEC 出版物上, 现已制定国际电工标准 3000 多个。

IEC 的认证委员会分别是电子元器件质量评定委员会 (IECQ)、电子安全认证委员会 (IECEE)、防爆电气认证委员会 (IECEX)。1996 年成立的合格评定委员会 (CAB) 负责制定包括体系认证工作在内的一系列认证和认可准则。

## (2) 技术委员会

下列技术委员会涉及电子设备的防干扰问题。

TC8: 研究标准电压、电流和频率, 建议关于电力质量的新工作项目, 并进一步发展为标准。

TC12: 研究无线电通信。

TC17: 研究开关设备与控制机构。

TC18: 研究船舶中的电装置。

TC22: 研究大功率电子学。

TC23: 研究电器附件。

TC27: 研究工业电热设备。

TC34: 研究电灯与有关设备。

TC36: 研究绝缘子。

TC40: 研究电子设备用的电容器与电阻器。

TC44: 研究工业机械的电设备。

TC45: 研究核测量仪表。

TC46: 研究通信设备用的电缆、电线和波导。

TC61: 研究家庭用电的安全。

TC62: 医疗电器设备技术委员会, 主要任务是制定与医疗电器设备的制造、安装和使用有关的国际标准。

TC64: 研究建筑物的电装置。

TC65: 研究工业过程的测量与控制, 负责制定工业过程和控制有关连续和单次操作的系统和限值的国际标准。TC65 将电磁环境分为以下几个等级:

- ① 完善的防护环境。
- ② 防护型环境。
- ③ 有代表性的工业环境。
- ④ 严重恶劣的电磁环境。
- ⑤ 需要进行分析的特殊情况。

TC72: 研究家用电器的自动控制。

TC74: 研究数据处理设备和办公机械的安全和能效, 制定包括商用电子和通信设备在内的信息技术设备的安全和能效要求的标准。

TC77: 研究电子设备的有害影响, 这些电子设备从市电获得电源并把影响加到电网中, 传给电网中的其他用户。TC77 成立于 1973 年 6 月, 组织结构包括 TC77 全会和 SC77A、SC77B、SC77C 3 个分技术委员会。各 SC 的工作范围为:

- ① SC77A: 低频现象。
- ② SC77B: 高频现象。
- ③ SC77C: 对高空核电磁脉冲的抗扰度。

## (3) 出版物

IEC 的出版物包括标准、技术规范、技术报告, 为适应市场需求, 还出版公开规范、指南、

工业技术协议和技术走向评估报告。

## 2. 国际无线电干扰特别委员会 (CISPR)

CISPR 是 IEC 的下属机构, 是 IEC 用字母符号表示而不用数字表示的唯一委员会。1933 年, 应有关各国际组织的要求在巴黎召开了一次特别会议, 由 IEC 发起组成了国际无线电干扰特别委员会, 并于 1934 年举行了第一届全体会议, 其宗旨是促进制定有关工业干扰方面的国际协商的建议, 并鼓励各国遵守。

CISPR 有独立的批准权和发布规则。任何其他国际组织只要对国际无线电干扰消除方面的问题感兴趣都可以由全体会议接受成为 CISPR 的成员。

CISPR 的活动包括消除 10kHz 以上频率范围的工业无线电干扰的所有问题, 它有七个分委员会, 分别处理和研究不同的干扰问题及其方法。

- (1) A 分会: 研究无线电干扰测定及统计方法。
- (2) B 分会: 研究来自工业、科学、医疗用高频设备的干扰。
- (3) C 分会: 研究来自强电线、高压装备及电力牵引系统的干扰。
- (4) D 分会: 研究来自汽车和内燃机等方面的干扰。
- (5) E 分会: 研究接收机的干扰特性及抗干扰特性。
- (6) F 分会: 研究来自电动机、家用电器以及照明器具等的干扰。
- (7) G 分会: 研究来自信息技术设备的干扰。

## 3. 国际电信联盟 (ITU)

### (1) 概况

国际电信联盟简称电联, 是国际电信领域的标准化组织, 也是世界各国政府的电信主管部门之间协调电信事务方面的一个国际组织。它是最老的国际组织之一, 1865 年 5 月 17 日, 国际电报联盟在巴黎由 20 个欧洲国家政府组织成立, 签订了一个“国际电信公约”; 1906 年, 27 个国家的代表在柏林签订了一个“国际无线电报公约”, 目的在于为其电报网制定标准以便互通; 1927 年, 国际无线电咨询委员会 (CCIR) 在华盛顿成立并成为国际电报联盟的一个组成部分; 1932 年, 70 多个国家代表在西班牙马德里开会, 决定把上述两个公约合并为一个“国际电信公约”, 将国际电报联盟改名为国际电信联盟; 1947 年, 国际电信联盟成为联合国的一个专门机构。

ITU 现有会员 189 个国家和地区, 部门成员 580 多个, 总部设在日内瓦。我国由信息产业部派常驻代表。ITU 使用 6 种正式语言, 即中、法、英、西、俄、阿拉伯文, 出版正式文件用这 6 种文字, 工作语言为英、法、西 3 种。ITU 是联合国的 15 个专门机构之一, 每年要向联合国提出工作报告, 但 ITU 不是联合国附属机构, 因此, 它的决议和活动不需联合国批准。

ITU 的宗旨是: 维持和扩大国际合作, 以改善并合理使用各类电信业务; 促进新技术的发展和应用, 扩大技术设施的用途, 以提高电信业务的效率; 促进电信业务在全球普遍使用, 协调各国行动, 以达到上述目的。

### (2) 组织机构

现在的 ITU 包括三大部门, 即电信标准化部门、无线电通信部门和电信发展部门。

电信标准化部门主要职责是研究技术、操作和资费问题, 制定全球性的电信标准。研究结果以建议书的形式出版, 尽管不具有约束力, 但由于这些建议可以保证网络的互连互通, 有利于在全球范围内提供电信服务, 因而得到广泛采纳。

无线电通信部门研究无线通信技术和操作, 出版建议书, 还行使世界无线电行政大会和频率登记委员会的职能, 包括: 无线电频谱在陆地和空间无线电通信中的应用; 无线电通信系统的特性和性能;

无线电台、站的操作；遇险和安全方面的无线电通信。

电信发展部门的职责是鼓励发展中国家参与电联的研究工作，组织召开技术研讨会，使发展中国家了解电联的工作，尽快应用电联的研究成果；鼓励国际合作，向发展中国家提供技术援助，在发展中国家建设和完善通信网。

#### 4. 国际无线电咨询委员会（CCIR）

国际无线电咨询委员会成立于 1929 年，是国际电信联盟的下属机构，其职责是研究与无线电通信有关的技术和运营问题，并在这方面拟订建议，但不制定任何规则。

CCIR 现有下列几个研究组在工作：频谱利用和监测研究组、空间探索和射电天文业务研究组、频率约在 30MHz 以下的固定业务研究组、利用卫星的固定业务研究组、在非电离媒质中的电波传播研究组、在电离媒质中的电波传播研究组、标准频率和时间信号业务研究组、移动通信业务研究组、采用无线电中继系统的固定业务研究组、电台广播业务研究组、电视传播业务研究组。

#### 5. 国际无线电科学联盟（URSI）

国际无线电科学联盟成立于 1919 年，是国际科学联合会的组成机构。总部设在比利时的布鲁塞尔，每三年召开一次全体会议。

URSI 分设 A、B、C、D、E、F、G、H、J、K10 个科学委员会，其中，E 委员会主要进行天然和人为干扰源的基础研究，同时也把电磁环境作为一个整体研究，目的是准备一个数据库和测试工具对通信电子设备的干扰及其影响作统一处理。

#### 6. 国际电线电缆学术讨论会（IWCS）

国际电线电缆学术讨论会（IWCS）主要在美国活动，有 20 多个国家参加了该组织，研究线缆构造、材料、规格、试验、施工、维护及制造等相关课题。

#### 7. 跨国电气电子工程师学会电磁兼容专业学会（IEEE EMC-S）

美国无线电工程师学会（IRE）于 1957 年成立了射频干扰专业学组。1959 年，射频干扰专业学组改名为电磁兼容专业学组并召开了首届电磁兼容学术讨论会。1963 年，无线电工程师学会与美国电气工程师学会和美国电子工程师学会（AIEE）合并，成立跨国电气电子工程师学会（IEEE），在全世界发展会员（现拥有 40 万会员，遍布 130 多个国家）。1964 年，跨国电气电子工程师学会将无线电工程师学会的《射频干扰学报》改名为《电磁兼容学报》。1978 年，电磁兼容学组改名为电磁兼容专业学会（EMC Society）。

#### 8. 欧洲电信标准协会（ETSI）

ETSI 是由欧共体委员会 1988 年批准建立的一个非营利性的电信标准化组织，总部设在法国南部的尼斯。该协会的宗旨是：为实现统一的欧洲电信大市场，及时制定高质量的电信标准，以促进电信基础结构的综合，确保网络和业务的协调，确保适应未来电信业务的接口，以达到终端设备的统一，为开放和建立新的电信业务提供技术基础，并为世界电信标准的制定作出贡献。

ETSI 目前有来自 52 个国家的 789 名成员，涉及电信行政管理部门、国家标准化组织、网络运营商、设备制造商、业务提供者、用户以及研究机构等。成员可分为正式成员、候补成员和观察员三类。至今已有 5000 多项标准或技术报告等发布，对欧洲乃至世界范围的电信标准的制定起着重要的推动作用。

### 7.1.3.2 国内相关机构

近年来由于实际生产、科研及使用上的迫切需要，以及“3C”标准的强制实施，我国对电子



设备防干扰技术已引起重视,加速了研究步伐,纷纷成立与电子设备防干扰有关的组织机构。

### 1. 电磁兼容学术组织

目前与电子设备防干扰有关的学术组织有全国无线电干扰标准化技术委员会、中国电工技术学会电磁兼容委员会、中国电机工程学会电磁干扰专业委员会、中国电源学会电磁兼容委员会、中国通信学会电磁兼容委员会、中国电子学会电磁兼容分会、中国铁道学会电气化专业委员会防干扰学组、中国造船学会电磁兼容学组、湖北省电磁兼容学会、湖南省电磁兼容学会、陕西省电子学会电磁兼容委员会等。

这些组织成立后,在电子设备防干扰领域频繁开展学术活动,并先后联合组织了数十次全国性的学术会议。

### 2. 部分电磁兼容性检测机构

(1) 信息产业部通信计量中心无线通信与电磁兼容实验室。

(2) 中国电子技术标准化研究所国家进口电子产品商检实验室、电子工业安全与电磁兼容检测中心。

(3) 航天电磁兼容检测中心。

(4) 中国计量科学研究院 CATV 检测中心。

(5) 西南电磁兼容监督检测中心。

(6) 海军电磁兼容研究检测中心。

(7) 国家广播电视产品监督检测中心。

(8) 中国家用电器研究所 EMC 室。

## 7.2 电磁干扰控制技术

### 7.2.1 电磁干扰控制策略

电子设备防干扰控制是一项系统工程,应该在设备和系统设计、研制、生产、使用与维护的各阶段都充分地予以考虑和实施才能有效。在控制方法设计上,除了抑制干扰传播的技术,如屏蔽、接地、搭接、合理布线等方法以外,还可以采取回避和疏导的技术处理,如空间方位分离、时间闭锁分隔、频率划分与回驻、滤波、吸收和旁路等。有时这些回避和疏导技术简单而巧妙,可以代替成本费用昂贵的硬件措施,收到事半功倍的效果。它们是精明的电磁兼容工程师们经常采用的控制方法。

#### 7.2.1.1 空间分离

根据电磁场的特性,在近区感应场中,场强分布按  $1/r^3$  衰减,远区辐射场的场强分布按  $1/r$  减小。空间分离是通过加大干扰源和接收设备之间的空间距离,使干扰电磁场在到达接收设备时其强度已衰减到最小限度,实质上是利用电磁场特性来达到抑制电磁干扰的目的。

空间分离的典型应用是在系统布局时把相互容易干扰的设备尽量安排得距离远一些;在布线中,限制平行线间的最小间距。

空间分离的应用还包含在空间有限的情况下,对辐射方向的方位调整、干扰电场矢量和磁场矢量在空间相位的控制。例如,在飞机和导弹上有许多通信天线,它们只能安装在机身和机翼的有限范围内,为避免天线相互干扰,常用控制天线的方位角来实现空间分离。又如,在电子设备

内部,为了使电源变压器铁芯泄漏的低频磁场不在印制板的回路中产生感应电动势,应该使印刷板平面与变压器泄漏磁场方向平行。

### 7.2.1.2 时间分隔

当干扰非常强,不易加以抑制时,通常采用时间分隔的方法,使有用信号传输在干扰信号停止发射的时间内进行。或者当强干扰信号发射时,使易受干扰的敏感设备短时关闭。人们把这种方法称为时间分隔控制或时间回避控制。

主动时间分隔法,是按照干扰时间特性与有用信号时间特性的内在规律设计的控制干扰方法。当有用信号出现的时间与干扰信号出现的时间有确定的先后关系之情况下,采用主动时间分隔方法。例如,干扰信号出现在 $t_1 \sim t_2$ 时间内、而有用信号在 $t_1$ 时间之前出现,此时应提前发送有用信号或者加快有用信号的传输速度,使有用信号赶在干扰出现之前传输完毕。如果有用信号出现在干扰信号之后,可采用延迟发射电路让干扰信号通过之后再发射有用信号,这样就可以使接受信号的设备在时间上将干扰与有用信号区分开来,达到剔除干扰的目的。

被动时间分隔法,是利用干扰信号或有用信号出现的特征使其中某一信号迅速关闭,从而达到时间上不重合、不覆盖的控制要求。如果干扰信号是阵发性的,而有用信号出现时间又是不能预先确定的,这样两个信号就不能确定它们的出现时间,只能由其中一个来控制另一个,使之分隔。例如,飞机上的雷达工作时,发射功率很强的电磁波,对于机上其他无线电设备的工作是一个很强的干扰源,为了不使无线电报警装置接收干扰信号而发出警报,可采用被动时间分隔法,由雷达首先发一个封锁脉冲,报警器接收到之后立即将电源关闭,这样雷达工作时,报警器就不会发出虚假警报,实现了时间分隔。当雷达关闭后,报警器又重新接通电源恢复工作。

时间分隔方法在许多高精度、高可靠性的系统和设备中经常被采用,例如卫星、宇航空间站、航空母舰、武器装备系统等。它成为简单、经济而行之有效的控制干扰方法。

### 7.2.1.3 频率划分和管制

有用信号和干扰信号都是由一定的频率分量组成的,利用系统的频谱特性将需要的频率分量全部接收,将干扰的频率分量加以剔除,这就是利用频率特性来控制电磁干扰的指导思想。在这个原则下形成了很多具体的方法,如频谱管制、滤波、频率调制、数字传输、光电传输等方法。

#### (1) 频谱管制

为了防止电磁信号相互干扰,人们把频谱资源进行了分配和管理,这就可以减少有意发射电磁波的相互干扰,例如将频谱分成许多频段,不同用途的电磁波只能在自己的频段内工作和传播。

在世界范围内,由国际无线电组织规定了频率分配和使用的规则,制定了频率分配表。这个规则划分了9kHz~275GHz的频谱范围,规定了广播、航空、航海、固定通信、宇宙通信、探测、天文、科研等39种无线业务的频率范围。在全球范围内分配4~7.5MHz频率,作为各种专用业务频率,以免电离层反射到全球引起干扰。

每个国家根据国际电信公约和国际无线电规则设立国家级的频谱管理机构,为本国分配和管理无线电频谱,在我国则由全国无线电管理委员会负责分配、协调和管理。

频谱管制方法对于无意发射的电磁干扰不适用,因为无意发射的电磁干扰中的干扰频率分量不可能由人工来指定。

#### (2) 滤波

滤波技术是一种常用的控制电磁干扰的措施,滤波的实质是将信号频谱划分成有用频率分量

和干扰频率分量两段,剔除干扰部分。当有用信号中含有干扰信号并且能够确定有用信号和干扰信号占据频谱的分量时,可采用滤波方法使干扰信号频率分量得以剔除和抑制,从而保留有用信号的频率分量。

例如,低通滤波器只通过低频有用成分,抑制或削弱高于截止频率的成分;高通滤波器只通过高频有用成分,剔除截止频率以下的干扰成分;带通滤波器只通过某一频带宽度的频率成分,低于或高于带宽的频率成分均不让通过,加以抑制或衰减;带阻滤波器只抑制某一频率宽度范围内的频率成分,带宽以外的频率分量都可以通过。

滤波技术不仅常见于控制电源中的传导干扰的传输,而且也应用于辐射信号。辐射信号滤波器有发射机的谐波滤波器、接收机的选频滤波器等。

### (3) 频率调制

通常在长距离信号传输过程中容易引入干扰,而且这种干扰的频谱较宽,难以确定具体的频率成分,为提高信号传输质量,可以采用频率调制方法。

信号调制分为幅度调制和频率调制两种制式,幅度调制是将待传输的信号经某一较高的固定频率的信号调制,调制后产生的载波信号具有较高的频率,既便于发送,又能防止引入干扰。无线电广播发射的调幅波信号就是采用这种幅度调制方式。

图 7-1 是频率调制传输的原理图。在传输过程中如遇电磁干扰,只影响其幅度,极难影响频率,因而接收信号的质量较高。广播电台的立体声调频信号就是经过频率调制传送的。

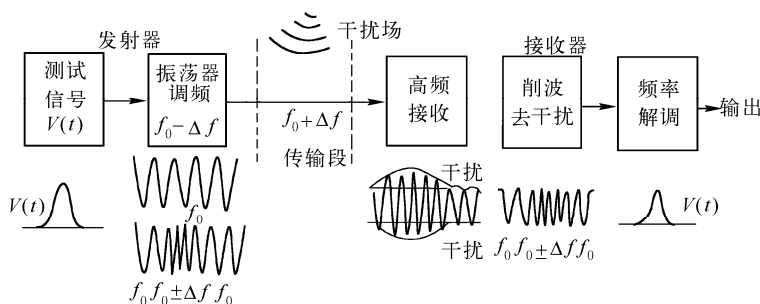


图 7-1 频率调制传输原理图

### (4) 数字传输

另一种防止信号在传输过程中被干扰的方法为采用数字传输技术,将待传送的信号经过高速采样、模-数转换,使之变成数字信号,成为一系列对应于原信号幅度的调制脉冲。

数字传输技术的采样频率应大于两倍以上传送信号的最高频率成分,否则信号的信息就不能全被包含在数字信号中。经过采样后,将连续变化的信号波形变成为阶梯状波形,通常称为量化,量化会带来误差。信号的数字传输技术在通信工程中应用较多,目前已应用在电视图像信号的传播工程中,以提高图像的清晰度。

### (5) 光电传输

随着光纤技术的发展,通信工程中越来越广泛采用光纤传输信号,因为光信号的波长远小于电磁干扰频谱的波段,因此如同频率划分一样,它一般不会受电磁干扰。光电传输的原理是采用光电二极管将电信号转换成红外光或可见光,使光的强度与电信号成比例变化,然后通过光导纤维传输,到达接收端后,再由光敏器件将光信号还原成电信号。

### 7.2.1.4 电气隔离

电气隔离是避免电路中干扰传导的可靠方法,同时它还能使有用信号正常耦合传递。常见的电气隔离耦合方式有机械耦合、电磁耦合、光电耦合三种。

机械耦合采用的是电气-机械的方法。如继电器将线圈回路和触头控制回路隔离开来,成为两个参数不相关联的回路,实现了电气隔离;然而控制指令却能通过继电器动作从一个回路传递到另一个回路中去。

电磁耦合采用的是电磁感应原理。例如,变压器由初级电流产生磁通,磁通再产生次级电压使初级回路与次级回路在电气上隔离,而电信号或电能却能由初级传递到次级去,这就使初级回路中的干扰不能由电路直接进入次级回路。变压器除了用在电源中抑制传导干扰外,还在信号传递回路中作耦合和隔离用,如图 7-2 所示。

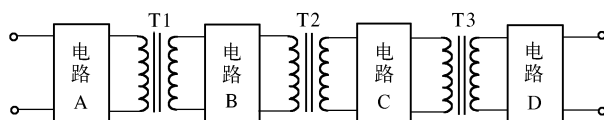


图 7-2 变压器隔离电路

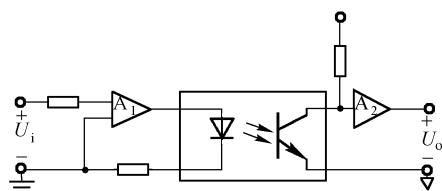


图 7-3 光隔离器原理图

光电耦合是采用半导体光电耦合器件实现的电气隔离方法。图 7-3 是由光电耦合器件组成的隔离放大器原理图。输入信号  $U_i$  经运算放大器  $A_1$  变成光耦器件发光二极管中的电流  $i$  变化量  $\Delta i$ , 发光二极管将电信号转换成光信号, 传递到光电耦合器件的接收部分, 光敏三极管的基极使三极管输出变化  $\Delta u$ , 再经  $A_2$  放大成为输出信号。输入回路与输出回路电气上完全隔离。

除了以上三种隔离原理以外,在电源供电系统中还经常采用 DC/DC 变换器进行电源隔离。DC/DC 变换器是直流电源的隔离器件,它将直流电压  $U_1$  变换成直流电压  $U_2$ , 输出电压  $U_2$  等于输入电压  $U_1$ , 也可小于或大于  $U_1$ 。为了防止多个设备共用一个电源引起共电源内阻干扰,利用 DC/DC 变换器单独对各电路供电,可以保证电路不受电源中的信号干扰。逆变原理将直流电压变换成高频交流电压,再经整流滤波处理,得到所需的直流电压。

### 7.2.2 静电干扰控制技术

在现代电子工业生产过程中,由于电子行业的迅速发展,体积小、集成度高的器件得到大规模生产,从而导致导线间距越来越小,绝缘膜越来越薄,致使耐击穿电压也愈来愈低。而电子产品在生产、运输、储存和转运等过程中所产生的静电电压却远远超过其击穿电压阈值,这就可能造成器件的击穿或失效,影响产品的技术指标,降低其可靠性。有些电子设备在正常使用时莫名其妙地发生故障,在排除了其他原因后,就要考虑因静电放电(ESD)造成的损坏。一个值得信赖的操作员即使在正常的设备操作中也可能因衣服或皮肤带有危害的电荷而使机器“死机”,甚至损坏硬件设备。由此可见,静电是电子行业发展中的一大障碍。所以预防静电必须提到议事日程上来,以确保产品的质量。

### 7.2.2.1 静电防护的目的和特点

电子工业中静电防护的根本目的是在电子元器件、组件和设备的制造过程中,通过一定的途径,防止静电的力学效应和放电效应而产生或可能产生的障害,或把损害限制到最小程度,确保产品的设计性能和使用性能不因静电作用而受到损害。

电子产品的静电防护工作,具有下述明显的特点:

(1) 超细、超薄的加工工艺和产品细微结构,使其对于静电放电的敏感性明显高于其他行业和产品,即便 20V 以下的静电放电电压也可能造成电子元器件的损害或破坏。

(2) 对静电敏感的产品,如半导体分立器件、集成电路、厚膜或薄膜电路及电阻器、电容器、压电晶体等,尤其是前三种电子敏感器件,它们可谓是电子设备的“心脏”。有鉴于此,对静电危害的防护问题,几乎涉及电子产品的各个技术领域,特别是那些要求体积小、工作频率高、安装密度大的电子设备更是如此。

(3) 静电防护工作是一项系统工程,它涉及敏感电子产品的制造、装配、处理、检查、试验、维修、包装、运输、储存、使用等各个环节,而且是一种串联模式,任一环节上的失误,都将导致整个防护工作的失败;同时,它又与敏感产品所处的环境(接触的物品、空气气氛、湿度、地面、工作台、椅子、加工设备、工具等)和操作人员着装(包括穿戴的服装、帽子、鞋袜、手套、腕带等)都有直接关系,任一方面的疏漏或失误,都将导致静电防护工作的失败。

### 7.2.2.2 静电控制原理

静电控制方面的措施有很多,从控制原理上讲主要有以下几个方面。

#### 1. 静电泄漏和耗散

将各种操作运行过程中产生的静电荷迅速泄漏和耗散是防止静电危害行之有效的方法。静电泄漏是通过替换电子生产过程中接触到的各类绝缘物(包括各种工装夹具和制品)而改用防静电材料并使之接地来完成的。

#### (1) 防静电材料的种类和特点

防静电材料又叫 ESD 防护材料。从防静电原理方面可以将其分为三类:导静电、静电耗散、电磁屏蔽耗散复合类。三种材料可以从导电性上加以区分,不同材料的静电防护原理和使用方法有所不同。

① 静电荷可以在导静电材料表面自由分布,导静电材料受到摩擦时,正负电荷可迅速扩散泄漏而不产生静电。导静电材料因其较低的电阻率在使用方面有如下特点:

- a. 导静电材料置于静电场中,其表面积累静电荷,必须将其接地才能将表面积聚的静电荷泄漏。
- b. 导静电材料可以用于静电敏感器件(SSD)生产装配环境中。
- c. 电阻率很小的导静电材料不适于用来作 ESD 防护包装。因为这种包装置于静电场中,表面积聚的静电荷可向器件放电造成器件失效。

② 静电耗散材料的电阻率高于导静电材料,静电荷在其表面移动速率大大低于静电导体,在使用方面有如下特点:

- a. 静电耗散材料受到摩擦时,在其表面产生的电荷较快扩散和泄漏。
- b. 因其较高的电阻率,不会造成材料放电,因此可以用来作 ESD 防护包装。
- c. 可用于一般的 SSD 器件生产装配环境中。

d. 此种材料使用时, 通常也要采取接地措施。

③ 电磁屏蔽耗散复合类材料是屏蔽材料与静电耗散材料复合而成。屏蔽材料电阻率极低, 为导体, 受到摩擦其表面不起静电荷, 可用于屏蔽射频和低频电磁场, 但因其电阻太小, 易在静电场中产生静电感应损坏器件。通常在屏蔽材料内层复合一层静电耗散材料。这种具有屏蔽效果的静电耗散复合材料可用作 ESD 防护包装。

## (2) 防静电材料的制备

ESD 防护材料通常是增加材料的电导率来实现。增大材料的电导率最主要的方法有:

① 外用抗静电剂法。例如用外部喷洒、浸渍和涂敷抗静电剂等方法。

② 外用持久性抗静电剂法。例如在塑料、橡胶等后加工过程中加入抗静电剂, 使材料表面因阳离子、阴离子相互吸引产生导电性。

③ 内加抗静电剂法。例如在橡胶、纤维、纸张、涂料中, 将抗静电剂采用不同工艺掺加进去。利用这种方法加入抗静电剂后, 材料具有持久抗静电效果。

④ 材料表面改性法。这是采用在材料表面形成有抗静电作用的亲水性高聚物皮层的方法。例如, 对于聚酯类材料, 可用聚乙二醇和 PET 的共聚物作皮层。

⑤ 与导电材料混用法。将高分子材料与导电材料混用, 使之具有导静电性能。

## (3) 泄漏与接地

在生产过程中产生的静电可以通过 ESD 防护材料及接地泄漏。通常所说的静电泄漏, 就是将 ESD 防护材料或导体上积累的静电荷用某些导静电方式, 将其泄漏到大地或者一个表面积足够的悬浮接地体上。由于静电电量和泄漏电流都比较小, 所以可以认为 ESD 防护材料和导体与大地之间的电阻不超过  $1\text{M}\Omega$  左右, 都可认为是静电接地。对于静电接地电阻, 国家标准 GB12158—90 规定: 静电导体与大地间的总泄漏电阻通常不应大于  $1\text{M}\Omega$ , 每组专设的静电接地的接地电阻值, 一般不应大于  $100\Omega$ 。在山区等地, 其接地电阻值也不应大于  $1\,000\Omega$ 。

电子工业静电接地有软接地和硬接地之分, 软接地是指地线串接阻值较高的电阻器后再与大地相连。软接地的目的在于将对地电流限制在人身安全范围之下 (通常为  $5\text{mA}$ )。软接地所需要的电阻值大小, 取决于靠近接点的人员可能接触到的交、直流电压值。硬接地是指将地线直接接地或通过一低电阻接地。一般情况, 硬接地用于静电屏蔽或仪器设备、金属体的接地。

## 2. 静电中和

静电中和是消除静电的重要措施之一。在某些场合, 当不便使用 ESD 防护材料时, 或必须将某些高绝缘易产生静电的用品存放在工作台或生产线上时, 为了保证产品质量就必须对操作环境采取静电中和措施。静电中和原理是将正负离子与静电源上的正负电荷中和, 从而消除静电源上积累的静电。产生正负离子的装置叫离子静电消除器, 其种类很多, 有高压式、同位素式、离子流式等。

静电中和也可采用静电刷 (静电梳) 来实现, 它是在金属棒上装上一排导电纤维。当静电刷与绝缘物相接触时, 或在接触过程中, 可因电晕放电、泄漏、短路等直接消除绝缘物上的静电荷。

静电中和还可采用抗静电剂来实现。这类抗静电剂通常是阳离子或阴离子表面活性剂。需要注意的是, 在某些情况下抗静电剂的使用只是将局部小面积静电荷扩散到某一大面积上, 使单位面积所带静电荷减少。

上述几种静电中和的方法相互比较, 离子静电消除器具有不影响产品质量, 消除静电快、使用方便等特点, 不足之处是仪器成本较高。抗静电剂的使用虽然具备操作简单等特点, 但从消除

静电效果来说,在某些情况下不如离子静电消除器效果好,而且持久性不佳;有的抗静电剂还具有腐蚀性和毒性。

### 3. 静电屏蔽与接地

静电屏蔽及接地通常用于高压电源产生的静电场屏蔽、静电敏感电路的屏蔽,从而避免静电场对 SSD 器件和 SSD 组件的感应和静电放电产生的宽频带干扰。

静电屏蔽的作用是通过将一个区域封闭起来的壳体实现的。壳体可以做成金属隔板式、盒式,也可以做成电缆屏蔽和连接器屏蔽。静电屏蔽的壳体一般有实心型、非实心型(如金属网)和金属编织带几种类型,后者主要用作电缆的静电屏蔽。

静电屏蔽效果定义为空间某一区域屏蔽后的静电场强度,比屏蔽前电场降低的分贝数。静电屏蔽效果优与劣,与屏蔽材料的性能有关,也与屏蔽体与静电源的距离,以及壳体上可能存在的各种不连续的孔洞有关。静电屏蔽效果与接地有很大关系,只有将屏蔽体接地,才能保证屏蔽体上感应的静电荷泄漏,使屏蔽体内的电路不受静电场干扰。

### 4. 增湿

湿度增加则非导体材料的表面电导率增加,可以使物体积蓄的静电荷更快泄漏。有静电危险的场所,在工艺条件许可时,可以安装空调设备、喷雾器以提高空气的相对湿度消除静电。为对静电达到最佳的控制,必须使湿度保持在 70%以上。一般情况下,对于表面容易形成水膜,容易被水润湿的绝缘体如橡胶等,用增湿法消除静电的效果是很明显的。

但需要指出的是,在电子工业,提高湿度这种方法不能被广泛应用。首先湿度过高会使工作人员感觉不舒适,而且会使设备生锈和材料受到损害。其次,对于表面不能形成水膜的材料如聚四氟乙烯等,增湿对消除静电是无效的。对于孤立(无静电泄漏途径)的带静电绝缘体,增湿也是无效的。此外要注意的是,增湿的方法不宜用于消除高温环境中的绝缘体上的静电。

### 5. 感应干扰控制技术

根据功率电平对各种电路和仪器进行分类,同时减小静电耦合和电磁耦合。

(1) 隔离 减小静电耦合和电磁耦合最简单最有效的方法,是将形成干扰源的高电平回路与其他电路隔离开来。这种方法在系统计划阶段中,并不需任何费用。

(2) 减小往复两导线间的间隔 如果导线间隔接近于零,那么就可大大减小感应电压。当然,过于接近,也相应增大线间电容,尤其在高频率下会影响频率特性。

(3) 缩短平行部分 因为两平行线间的电容和互感系数,与平行区间的长度成正比,所以要尽量缩短平行部分。当干扰电路和被干扰电路过于接近时,比较有效的办法是采取垂直交叉的手段。

(4) 减小配线的回路面积 由电磁耦合而引起的感应电压,与穿过配线回路内的磁通成正比,因此,设法减小回路面积是减小感应电压的有效方法。

(5) 接近地面配线 这是防止感应干扰的有效方法,但过分接近会增加分布电容。

### 6. 印制板防静电设计

#### (1) 使导线长度尽量短

天线要具有较高的效率,其长度必须是波长很大的一部分。这就是说,较长的导线将有利于接收静电放电脉冲产生的更多的频率成分;而较短的导线只能接收较少的频率成分。因此,短导线从静电放电产生的电磁场中接收并馈入电路的能量较少。有关设计步骤如下:

① 使所有元件紧靠在一起,PCB 设计人员不应将元件过于分散而占用更多的面积。

② 在相关的元件组,相互之间具有很多互连线的元件应彼此靠得很近。

③ 若有可能的话,从线路板的中心馈送电源或信号,而不要从线路板边缘馈送。当线路板为正方形时,这样做的效果最明显;当线路板狭长时,效果则不太明显。但只要可能,还是应该尽量这样做。

#### (2) 加强电源线和地线之间的电容耦合

在电源线与地线之间接入高频旁路电容(电容组合方式可适用于静电放电频率较低和较高的场合)。电源线与地线间的耦合将有助于减小电荷注入问题。两个物体之间由各个物体上电荷量的差异造成的电压取决于两者( $U=Q/C$ )间的电容。如果 $X$ 库仑的电荷注入到电源线中,就会在电源线和地线间产生 $Y$ 伏的电压。如果电源线与地线间的电容增加一倍, $X$ 库仑的电荷将仅仅产生 $Y/2$ 伏的电压。当然,这个较小的电压造成损坏的可能性也相应减小。

#### (3) 隔离电子元件与静电放电电荷源

注入到电子仪器中的电荷可通过隔离来解决。对于 PCB 设计,主要指将电子仪器与可能的电荷源隔离开,也与连接器端口或感应电流趋于集中的信号线相隔离。可采取以下两个步骤来进行隔离:

① 使电子元件与 PCB 走线远离会暴露在静电放电中的 PCB 部分(如操作人员可直接触摸到的地方)。

② 使电子元件和 PCB 走线远离会暴露在静电放电中的任意一个金属物体(包括螺钉、机架、连接器外壳等)。

(4) PCB 上的机壳地线的阻抗要低,尽管 PCB 轨线上的阻焊层有利于隔离 PCB 走线,但阻焊层可能会导致插针孔发生电弧。

① 隔离机壳地线的最好方法是使之远离电子仪器。另外,如果机壳地线的阻抗很低,静电放电电流易于通过,就不会发生电弧。当然,如此迅速的电荷泄放会产生更强的场,但这比电荷通过电弧直接注入到电路中好得多。

② 机壳地线的长度不能超过其宽度的 4 倍或 5 倍。比这个比例更宽的地线仅能使其阻抗(电感)稍微减小,但是更窄的地线却会使其阻抗大幅度增加。这个长宽比例意味着机壳地线必须很短才行,否则当地线增长时,其宽度要很宽。

#### (5) 设计规则的优先级

对于 PCB 静电放电问题的解决方案,可按以下规则来进行(按优先顺序排列)。

① 机壳地线的长度不应超过其宽度的 5 倍。

② 使未绝缘的电路与操作人员可触摸到的 PCB 区域或未接地的金属物体相隔至少 2cm 以上。

③ 电源线与地线要么并排平行地放在 PCB 的同一层上,要么放在相邻的两层。

④ 地平面和地线必须连成网格状。在任意一个方向上,垂直地线与水平地线至少每隔 6cm 连接一次。尤其是双面 PCB,也就是说,PCB 的第一层可以布水平的地线,而第二层可布垂直的地线,必须至少每隔 6cm 放置一个过孔以将两者相连(当然,在小于 6cm 的地方进行连接是更好的,地平面比地线网格要好一些)。

⑤ 所有信号线必须在地线面边缘或地线以内 13mm 以上。地线既可以布在与信号线相同的层,也可布在与之紧挨着的层上。如果信号线的长度达到 30cm 或以上,则必须在其旁边放置一根地线,在信号线上方或其相邻面上放置地线也是可以的。

⑥ 电源线与地线之间跨接的旁路电容器,彼此之间的距离不能大于 8cm(这样每片集成块可能会有多个旁路电容相连)。



- ⑦ 相互之间连线较多的元件要靠在一起。
- ⑧ 所有元件必须尽可能靠近 I/O 连接器。
- ⑨ 将 PCB 的空余部分全部填以地线(应注意在每隔 6cm 的地方进行连接以产生地线网格)。
- ⑩ 若有可能的话,将馈送电源线或信号线从 PCB 的边缘中心处引出,而不应从某一个角上引出来。

### 7.2.2.3 静电敏感器件保护网络

对静电敏感器件(SSD)设置保护网络,是防止器件被静电损害的有效措施之一。目前国内外已研制出多种保护网络。这些网络提供的防护 ESD 电压已达 800V,某些 MOS 器件的保护网络可达 4 000V 以上。保护网络往往由中等或在一定程度上敏感的 SSD 器件构成。需要指出的是,保护网络可以降低器件对 ESD 的敏感性,但不能彻底消除。

#### 1. SSD 器件保护网络的设计要点

(1) MOS 器件保护电路的改善方法是增大二极管的尺寸、使用双极性三极管、加串联电阻器和利用分布网络电路。

(2) 连接外引脚金属引线时,避免在下面交叉。

(3) 用串联电阻限制 ESD 电流,或使用并联元件把 ESD 电流从关键元件上引开。

#### 2. SSD 组件保护网络的设计要点

(1) 利用模拟开关或通过限制输出电流来避免 CMOS 闭锁。

(2) 在每个输入端加上外部串联电阻器,便可以获得对 MOS 的附加保护。

(3) 对于双极器件的敏感输入端,应该使用由电阻值相对大的电阻器和至少 100pF 的电容器组成 RC 网络,以降低 ESD 的影响。

(4) 印制电路板上的 SSD 器件引线,如果没有串联电阻、分路器、线夹或其他保护件,不应该直接与连接器端子连接。

(5) 装有开关板、控制面板、手控装置或开关锁定装置的系统,应该设计成能通过底座地线直接耗散人体静电荷的结构。

#### 3. 常用的保护网络

##### (1) 达到 ESD 保护目的的电路设计原则

众所周知,CMOS 器件最怕静电,这是由 CMOS 器件的氧化膜工艺决定的。在使用 CMOS 器件设计系统的接口电路(包括系统内各模块之间的接口)时要考虑加保护电路。一个好的电子系统设备应该在电路设计的最初阶段就考虑瞬态保护要求。保护电路的基本原理是,使用电压钳位电路阻止高压进入栅极同时提供大电流分流通路。有多种电路设计可以达到 ESD 保护的目,但选用时必须考虑以下原则,并在性能和成本之间加以权衡。

- ① 速度要快,这是由 ESD 干扰的特点决定的。
- ② 能应付大的电流通过。
- ③ 考虑瞬态电压会在正、负极性两个方向发生。
- ④ 对信号增加的电容效应和电阻效应控制在允许范围内。
- ⑤ 考虑体积因素。
- ⑥ 考虑产品成本因素。

##### (2) 常用的瞬态抑制保护电路

- ① 钳位二极管保护电路。利用现有电源的电压范围作为瞬态电压的抑制范围,二极管的正

向导通电流和串联电阻的阻值决定了该电路的保护能力。但这些元件参数的选定必须兼顾不影响信号正常传输的要求。该电路具有极好的保护效果，同时其代价低廉，是理想的保护电路，适合成本控制比较严、静电放电强度和频率不十分严重的场合。

② 压敏电阻保护电路。压敏电阻的阻值随两端电压变化而呈非线性变化。当施加在其两端的电压小于阈值电压时，器件呈现无穷大的电阻值；当施加在其两端的电压大于阈值电压时，器件呈现很小的电阻值。此物理现象类似稳压管的齐纳击穿现象，不同的是压敏电阻无电压极性要求。使用压敏电阻保护电路的特点是简单、经济、瞬态抑制效果好、对电路带来的负面影响甚微，且可以获得较大的保护功率。

③ 稳压管保护电路。背对背串接的稳压管对瞬态抑制电路的工作原理是显而易见的，将两只稳压管制作在同一硅片上就制成了稳压管对，使用更加方便。

④ TVS（瞬态电压抑制器）二极管。TVS 二极管是一种固态二极管，专门用于 ESD 保护。一般选择工作电压大于或等于电路正常工作电压的器件。TVS 二极管是和被保护电路并联的，当瞬态电压超过电路的正常工作电压时，二极管发生雪崩，为瞬态电流提供通路，使内部电路免遭超额电压的击穿或超额电流的过热烧毁。由于 TVS 二极管的结面积较大，使它具有泄放瞬态大电流的优点，具有理想的保护作用。但同时必须注意，由于结面积大造成结电容也大，因而不适合高频信号电路的保护。

改进后的 TVS 二极管还具有适应低压电路（ $<5V$ ）的特点，且封装集成度高，适用于在印制电路板面积紧张的情况下使用。这些特点决定了它有广泛的适用范围，尤其在高档便携设备的接口电路中有很好的使用价值。

#### 4. 保护电路设计的意义

保护电路设计在设备使用过程中以及在产品的制造、运输安装阶段均有重要意义。据一家显示器厂统计，在产品设计中未对视频输入通道和行、场同步通道增加钳位保护时，其半成品在生产线上经常发生视频通道三极管以及行、场 IC 的失效，但在这些通道上设计钳位保护电路后，几乎不再出现同类失效的例子。

#### 5. 电子设备中需加保护电路的部位

一般来说，与外部设备连接的接口电路都需要加保护电路，其中也包括电源线，这一点往往被硬件设计人员所忽视。以微机显示终端的设计作为例子来讲，应该考虑安排保护电路的环节有：串行通信接口、并行通信接口、键盘接口、显示接口等。但要注意，保护电路给通道增加的电容值和电阻值要保持在能够承受的范围内，过大的串联电阻会影响串行通信的传输距离。比如，在串行口设置保护后，有些需要从串行口的信号线取得电流、维持电路工作的“无源”设备往往会工作不正常，所以保护电路中的器件参数必须精心计算。除了在串行接口电路中安排额外的保护电路外，选择内部带有 ESD 保护功能的接口器件也是可取的办法。市场上带有 ESD 保护功能的接口器件的售价往往是常规器件的 5~10 倍。

并行接口、键盘接口加保护措施必要性在于其电路采用了 LSI，特别是 FPGA、ASIC 等可编程门阵列，给电路带来了不安全因素。在没有保护的情况下，电路板在车间流水线上调试时，会发现接口的损坏，用户正常操作时也会损坏设备，尤其在少雨地区更是如此。这时，带电插拔打印机、键盘等冒险操作是绝对不允许的。

显示接口的保护更有必要，这是因为显示控制器的设计已由以前的时钟、核心、数/模转换器三部分发展成为单片方案，因此显示控制器制造厂家已在向用户提供的推荐电路中增加了保护电路。显示和逻辑主板一体化后，虽然显示信号在内部互连，不向外输出，但其保护的必要性并

没有降低。其原因是,一体式机器中显示电路的打火产生的强电脉冲会轻易地导入显示信号接口电路;另外,无论一体式显示设备或分体式显示设备,往往设计有对比度调节旋钮,被用长线引到显示器的面框上,如果旋钮结构不合理或安装不周密,带静电的手指也会放电。要注意针对不同信号选择不同的电路,行同步、场同步信号是 TTL 输出,大多数保护电路都适用,RGB 视频信号输出电压是 0.7V (峰-峰值),使用串有电阻的二极管钳位电路具有很好的保护效果,钳位电压范围可以是 0~+5V。

印制电路板布线是抗瞬态冲击设计的重要方面。保护通道中的寄生电感会产生电压尖峰,量值会超过 IC 的引脚所能承受的极限值。根据 IEC 1000—4—2 标准,ESD 产生的瞬态冲击可能在 1ns 内达到峰值,在 1cm 长的引线上就会产生 80V 电压、10A 电流的脉冲。因此,设计时必须努力减小被保护信号线以及信号回路(地线)上的寄生电感量。可采取的措施有:尽量缩短引线长度、加大信号线的宽度、印制导线敷锡等。

#### 7.2.2.4 防静电制品及其使用

在电子产品生产过程中使用的防静电制品,也称为 ESD 防护用品。使用 ESD 防护用品的目的在于减少静电的产生、迅速泄漏静电以及屏蔽 ESD 产生的宽频带干扰等,使 SSD 器件不遭受 ESD 损伤。

##### 1. 人体静电防护及其用品

消除人体静电的出发点是减小泄放电阻,降低人体电量和对地电压,而泄漏电阻主要与鞋和地面材料电阻率有关。布鞋、橡胶底鞋电阻率较小;地面材料选择也很重要,大理石、水磨石、磁砖地面的表面电阻率低,电荷易泄漏,人体很难带高电压;而各类地板革、纯毛地毯、化纤地毯则容易使人带电,且电荷容易在人体积聚,释放缓慢。

另一个行之有效的办法是用抗静电剂喷洒地面,其主要成分是烷基水杨铬等表面活性分子,它具有较好的导电性和吸湿性。绝缘材料涂了抗静电剂,可以降低表面电阻率,加速电荷释放,对化纤地毯这样的材料,可以收到明显效果。衣服经过抗静电剂洗涤处理,起电率降低。

在室内,最简单的防静电措施是增大空气湿度,湿度大的环境里不易起电。寒冷、干燥的冬天就比潮湿的夏天容易受到静电电击,原因就在于此。仍以人穿塑料拖鞋在化纤地毯行走为例,空气相对湿度 10%时,人体静电达 35kV;但湿度增至 80%,电位仅 1.5kV,足见其影响之大。实验表明:在地毯上活动,空气湿度为 35%时,几乎所有材料的地毯都能使人受电击,而湿度 50%的环境中,仅尼龙地毯上的人受到电击。因此,室内放一台超声波加湿器,可以收到明显的防静电效果。

电脑监视器的静电场屏蔽比高频电磁波容易,在监视器屏幕前挂一块接地的细金属网就能阻挡绝大多数射向操作者的电力线。看电视时,离荧光屏 2m 以外,场强转弱,也能保护视力。以往人们认为显像管对人的危害来自电子轰击玻璃产生的 x 线,曾经一度流行过铅玻璃防护屏。但实际检测结果却说明 x 线是极微弱的,不必加防护措施。

人体静电防护系统主要由防静电的腕带、工作服、鞋袜等组成;必要时尚需辅以防静电的帽、手套或指套、围裙、脚套等。这种整体的防护系统兼具静电泄漏、中和与屏蔽的功能。

##### (1) 防静电腕带

操作者皮肤上的静电是 SSD 损坏的最常见的原因,现场测试表明,在未采取有效静电防护措施的情况下,操作工手工插装印制板时,手上静电压为 140~360V;进行锡焊作业时,手上静电压为 160~450V;特别当操作者从座椅上站起时,皮肤静电压最高可达 1000V。这些都远远超过

了所有静电敏感器件的安全电压 100V 的数值。而戴用防静电腕带（又叫手环、扣带）是解决这一问题的有效方法。

防静电腕带与皮肤直接接触，是一种通过接地而把人体皮肤静电导走的装置，它由松紧圈和接地组件构成。其中，松紧圈可由多种导电的复合材料制作，如镀银的单纤维和弹性尼龙丝的编织物、带有保护层的不锈钢纤维织物、碳浸渍的塑料软片等。接地组件也是防静电腕带的重要组成部分，接地组件必须串接（或材料本身具有）一定数值的电阻，以保证操作者在触及线电压等意外情况时不致发生人身伤害事故。可将保护电阻尽量安装在腕带与皮肤的接触点附近，减少腕带与地短路的机会。所串接的电阻，一方面应保证操作者触及线电压时流经人体的电流小于

5mA，另一方面又要保证人体静电能通过该电阻较快地泄放，使皮肤上积累的静电电压小于 100V。

操作人员的皮肤是否与腕带接触良好是发挥腕带泄漏静电作用的关键。为此，戴用腕带前可用防静电清洗液擦拭腕部皮肤，以减小干燥皮肤的高电阻；或者配用接地监视器，以使操作者经常受到提醒。

使用时的连接方法一般是将腕带的接地线通过一公共端子与工作台的导电台垫相连，垫子的接地线再通过公共端子与静电接地支线相连，如图 7-4 所示。

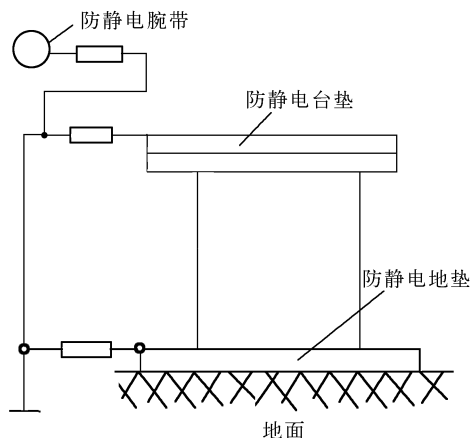


图 7-4 腕带的连接

## （2）防静电工作服

操作工在正常的生产活动中，所穿的服装与外界介质表面（如工作台面、椅面、工具、器具等）之间、各层衣服之间、内衣与皮肤之间、直至行走时鞋底与地坪之间，都会由于频繁的接触-分离和摩擦而使服装和鞋子带电；特别是在穿用高绝缘性能的化纤衣料时会使带电加剧。服装和鞋子的局部所带静电荷按介质上电荷的流散规律而逐渐流散到全表面，达到平衡时形成服装上一定的静电压。当然，由于人体本身是良好的导体，服装的带电会由于静电感应而使人体（皮肤）周身带电，也形成一定的静电压。于是对操作工而言就存在两个可能的放电通道：一个是指尖（皮肤）与接地导体间的放电，另一个是工作服与接地导体间的放电。这两种放电都可能对 SSD 造成损害。防静电腕带虽能消除第一种放电危险，但却不能消除第二种放电危险，这是因为腕带只能泄漏掉作为良导体的人体皮肤上的静电，而对泄漏掉绝缘性较强的服装上的静电则是无能为力的。在电子工业生产中，人们往往只注意到消除人体皮肤静电，而却忽视了或没有足够重视消除服装静电，这是需要改进的。

一般认为穿纯棉工作服可防止服装静电积累，因而是安全的。这种观点是片面的。实际上，仅当空气相对湿度高于 50%~60% 时才基本如此；而当相对湿度比较低时，纯棉制品的带电量明显增大。试验表明，在相对湿度低于 30% 时，纯棉织物的带电量与涤纶相当；而当相对湿度低于 20% 时，棉织物的带电量甚至会高于某些化纤织物。所以在气候干燥地区，不能指望在任何情况下都能用纯棉制品消除服装静电危害。

基于以上原因，为有效防止人体静电的 ESD 危害，操作者必须穿用防静电工作服。防静电工作服是用防静电织物为面料而缝制的工作服，防静电织物是在纺织时均匀地混入导电纤维或防静电合成纤维；导电纤维是指全部或部分使用金属或有机物的导电材料或亚导电材料制成的纤维的总称。防静电工作服是基于电荷的泄漏与中和两种机理，当接地时，织物上的静电除因导电纤维的电晕放电被中和之外，还可经由导电纤维向大地泄放；不接地时则借助于导电纤维的微弱的

电晕放电而消电。

防静电工作服在穿用及管理时应注意以下事项：

- ① 服装应全部使用防静电织物，应根据 SSD 静电敏感度的不同，选用不同等级的防静电布料。
- ② 禁止在防静电服上附加或佩带任何金属物件。
- ③ 不许在操作 SSD 的场所穿或脱工作服（应在指定的更衣室穿或脱）；工作服的纽扣应全部扣上。
- ④ 应避免使工作服在洗涤时受到较强的机械或化学损伤。
- ⑤ 批量购回的防静电工作服在穿用前应随机地选出数件检测带电量；穿用一定时期后，特别是穿用者脱衣时有电击感时要进行复测。

需要指出的是国家标准 GB12014—89 对防静电工作服带电量规定的指标只适用于化工和石油系统。因为电子工业静电防护要求更为严格，所以，电子工业用防静电工作服带电量应低于 GB12014—89 的要求。

### （3）防静电工作鞋、袜

穿用防静电服时必须与防静电鞋配套使用。防静电工作鞋是指鞋底用电阻变化小的导电性物质制作的工作用皮鞋、布鞋、胶鞋、拖鞋等。鞋底是制作防静电鞋的关键部位，要求鞋底必须具有使人体通过鞋底与大地构成回路的材料和结构，以使人体产生的静电能向大地泄放掉；常用的鞋底材料是导电橡胶。

防静电鞋的使用注意事项如下：

- ① 穿用防静电鞋必须配用薄型尼龙袜或混有导电纤维的袜子；而不应穿毛线和化纤材料的厚袜子；防静电鞋里不得另附鞋垫，特别是绝缘性鞋垫。
- ② 不要在鞋底上粘贴绝缘胶片或其他涂料。
- ③ 新购回的防静电鞋在使用前，应对其电阻值全部进行检查并记录；在使用一段时间后，特别是当鞋的表面显著污染、鞋底磨损、鞋体变形或穿用人员有静电电击感时，都必须对防静电鞋的电阻进行复测、核查。
- ④ 防静电鞋的电阻受湿度影响会发生变化，故在夏季和冬季应作对比测试，以掌握变化幅度。

### （4）防静电工作帽、手套（指套）

在生产半导体和集成电路的洁净室和超洁净室以及高精密电子产品的装配车间中，都要求操作者戴用防静电的工作帽和手套或指套。它们可选用相应的防静电布料或导电纤维制作。

## 2. 防静电地坪

为有效地使人体静电能通过地坪尽快泄漏于大地，除操作人员穿用防静电服、防静电鞋外，其先决条件是地坪必须具有一定的导电性能，即是防静电的。这种防静电地坪也能泄放设备、工装上的静电及移动操作、不宜使用腕带的人体静电。

防静电地坪是用电阻率较低的材料制作的地坪。一般来说，地坪材料的电阻率越小，地坪及置于其上的导体越不容易带电。但地坪导电性能过于好时，例如，将设备、机器直接放在大的金属板上，则很容易因城市噪声而发生各种危害。

### （1）防静电地坪的分类及特点

① 静电橡胶板地面。在一般橡胶配方中加入导电性物质，如碳黑、石墨和金属粉末等填料，就制成了电阻率较低的防静电橡胶。其中，用碳黑制造的防静电橡胶无论其防静电性能还是其他

物理机械性能都最好；掺入石墨的次之；而渗入金属粉末的性能一般。

防静电胶板外观除黑色以外，尚有浅色和绚丽的彩色胶板。防静电橡胶板地坪就是用防静电胶板铺装而成的。地坪的电阻值除与胶板电阻率有关外，还与基层电阻值有关。

防静电胶板的铺装方法有浮铺和粘贴两种。浮铺是将 5~10mm 厚的胶板直接铺设于地面。其优点是灵活、方便，缺点是胶板接缝处和下面易积聚灰尘。粘贴法是将胶板用导电胶液粘贴于地面上。需要注意的是，如被铺设的基层地面是木板或沥青等绝缘地面，则铺设胶板前必须先在地面上贴铜片或铝片，并使之接地，然后把胶板铺装其上。对于水磨石类非绝缘地面，可不用金属片，而直接铺装胶板。

总的来说，防静电胶板地坪具有施工简单、抗静电性能优良、地面弹性好等优点，特别适用于旧厂房改造、生产线调整以及其他需临时采用防静电地面的场所。缺点是胶面易污染磨损、且成本较高。

② 防静电塑料地板。在电子工业中应用的防静电塑料地板有三种类型。防静电不饱和树脂地板是在聚酯不饱和树脂中加入导电填料，以降低其电阻率。这种地板的优点是质轻、色浅、施工简便、耐酸碱；缺点是耐水性差。

防静电聚氨酯地板是在地面施工时所用材料的一种双组分、黏稠状物质，其中 A 组分为聚氨酯预聚体，B 组分是由固化剂、填充剂等组成的复合物。施工时，将 A、B 两组分按一定比例混合并搅拌均匀，即可涂刷在基层地面，24h 后地面基本固化，5~7 天后充分固化即可投入使用。其优点是与基层地面粘接力强，耐酸、碱、水等。

永久性 PVC 防静电塑料地板是利用聚氯乙烯等高分子复合材料的非线性特征，针对不同环境和条件而设计的。这类材料具有重量轻、强度高、耐化学药品性好和防静电效果持久等特点；但其耐污和绝缘性能稍差一些。

③ 防静电地毯。它是在地毯用纱中混入一定量的导电纤维制作成的。使用较多的导电纤维是不锈钢纤维、碳纤维和复合纤维。为提高地毯的防静电性能，要求在地毯纤维使用导电纤维的同时，其底布也应是防静电的，对于割绒化纤地毯来说，这一点更是必要的。为此，可在地毯的底布胶中混入碳素纤维。

用上述工艺制作的地毯即使在较低的相对湿度（40%以下）也具有有良好的防静电性能，而且还解决了普通化纤地毯吸附尘埃的问题，可满足电子工业工作间和精密计算机房铺用的要求。防静电地毯上附设有接地端子，使用时直接与工作区静电接地线相连。

防静电地毯防静电效果明显，受环境温湿度影响小，铺设方便、美观；缺点是易受污染、成本高。

④ 防静电活动地板。这种地板以分为钢制、铝制、木质、水泥和树脂基地板。所用的地板贴面有三聚氰胺、PVC 和树脂类。金属结构的地板强度高、阻燃、变形小、使用寿命长，缺点是成本高、重量大。木质基地板抗震性好、成本低，缺点是强度低、使用寿命短、易变形。树脂基地板加工成型容易，缺点是易变形和成本较高。

地板块靠支架支撑，支架能调节上下高度以保证各板块在同一水平面上。防静电活动地板的优点是防静电效果好、美观，地板与支架底面之间形成的空间可来自自由铺设、连接各种管、线，或作为空调的静压送风、回风。缺点是成本高，使用时间长了易发生变形、扭曲，板面的耐磨和清洗也有待解决。

⑤ 防静电沥青砂浆地板。这种地板以砂石、石粉、石油、沥青和导电添加料（乙炔碳黑）在一定条件下经拌合、铺设、碾压而成。其防静电性能取决于乙炔碳黑的作用，而地板的光洁度、

机械性能则与地板中各成分的配比有关。

这种地板的优点是耐压、耐冲撞、防裂、防老化、造价低,缺点是地面颜色选择性差。

⑥ 水泥类防静电地板。这种地板包括水泥砂浆、水磨石、菱苦土等类型。测试表明:在一般环境条件下,按常规方法施工的水泥类地板可用作防静电地板。但对于二层以上的楼房地面由于干燥而不能确保其防静电性。应采用在面层下铺设接地装置(如金属丝网)的施工方法。

由于水泥类材料是多孔、亲水性物质,所以具有良好的吸水性能,而其电阻值又是随含水量而变化的,当含水量增大时,其电阻值明显下降。因此,在设计、使用水泥类地板时,可利用这一特点达到控制地板电阻值的目的。

水泥类地板的优点是施工方便、经久耐用、造价低廉;缺点是比较坚硬、易起尘。

### (2) 防静电地板的使用要点

- ① 地板的泄漏电阻每年至少应测量两次,其中一次应在干燥季节测量。记录测量结果并保存。
- ② 在相对湿度低于30%时,应增加测量泄漏电阻的次数;当发现电阻比较大时可洒少量的水。
- ③ 在工作地面上使用防静电垫时,每年至少应检查一次垫的接地情况并测量泄漏电阻。
- ④ 当地板上附着有绝缘性的油污、树脂和橡胶时,应根据情况定期清除。

## 3. 抗静电剂

### (1) 抗静电剂的分类

抗静电剂按实际使用情况分为内部混炼型和外部涂敷用抗静电剂两类。内部混炼型是通过机械混合方法使抗静电剂均匀分散于树脂中,或是用化学混合的方法将抗静电剂溶解于树脂单体中参加聚合。混炼后的抗静电剂分子可以从塑料内部向表面迁移形成导电层。表面的抗静电剂经磨损后,内部的抗静电剂分子不断地向表面迁移,继续恢复抗静电性能,这样增加了抗静电的耐久性。外涂型抗静电剂的使用是用有机溶剂或水把抗静电剂配成溶液,再以喷涂方式处理塑料或纤维表面,静电电荷通过涂层泄放。此方法操作简便,不会引起制品在加工成型时的热分解。但涂层会溶解和磨损,外部涂敷只能保持短时间的抗静电效应。

抗静电剂一般都是表面活性剂,从化学组成上可分为阳离子型、阴离子型、非离子型和两性离子型、高分子型。其中,阳离子型抗静电剂抗静电效果最好,但耐热性欠佳。阴离子型、非离子型抗静电剂耐热性较好,但应注意和树脂的相容性。

### (2) 抗静电剂的机理

抗静电剂一般都是表面活性剂,此类表面活性剂可以渗透到表面,在塑料或橡胶表面排列。其中亲水基因吸收空气中的水分而形成一层极薄的导电层。由于水是挥发性的,所以泄放电荷的作用只是暂时的。要充分发挥抗静电剂的作用,就必须确保水分子的存在。也就是说,环境中的相对湿度越大,塑料、橡胶的电阻就越小。

一些新型抗静电剂,如聚合型离子抗静电剂,不是靠吸水而导电,而是使聚合物中少量电解质产生离子化倾向,从而达到降低表面电阻的目的。

### (3) 抗静电剂的使用注意事项

抗静电剂主要应用于减少由摩擦产生的静电。可以用刷、喷涂、浸渍或其他方法加在地板、地毯、工作台台面、零件托盘、零件运载器、椅子、墙、天花板、工具、纸、塑料和蒙皮上,使它们在不同程度上成为ESD防护物体。某些抗静电剂也是良好的清除剂,可以同水混合清洗像地板与工作台这样的表面,同时也起到抗静电的作用。

抗静电剂不适用于电路板、零件或组件,因为抗静电剂会增加导电性,或者影响焊接性。定期检验抗静电剂效果的方法是通过与某种像普通聚乙烯这样的材料摩擦,然后用静电表监测电荷

及其衰减时间,或用合适的设备测量材料样本的表面电阻系数。

挑选抗静电剂时,要考虑的特性,除其抗静电性能以外,还包括禁止细菌生长、无毒性、无腐蚀性、无可燃性、对人无刺激性。

#### 4. 静电消除器

上述防静电制品都是利用各种方法降低绝缘材料的电阻率,从而加快静电的泄放、减少物体上的静电积累量。但是,并非所有的场所都可以利用接地技术泄放静电,此时,就应利用静电消除器来中和物体上的静电荷,特别是对于正在被操作的 SSD 本身、工作台面等,用中和法减小其带电是很有效的。

静电消除器(简称消电器,又称电中和器或离子平衡器)的原理是:利用高压电场或放射性射线的作用使空气局部电离造成大量离子和电子对,其中与带电体极性相反的离子(或电子)向带电体趋近并与之发生电中和作用,以达到消除静电的目的。

按照所用电离源和结构的不同,可分为感应式消电器、高压消电器、放射性同位素消电器和离子风消电器。

##### (1) 感应式消电器

如图 7-5 所示,在带电体上方安装一个接地的针电极就构成了最简单的感应式消电器。由于

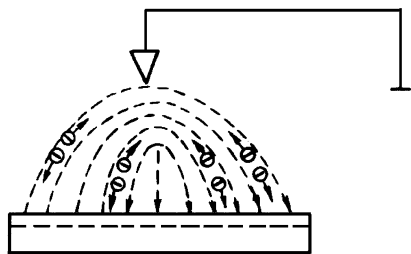


图 7-5 感应式消电器的工作原理图

静电感应的缘故,在针尖上会感应出密度很大的异号电荷,因而在针尖附近形成强电场,使周围空气发生局部电离,即形成电晕放电;电晕区内产生的大量正离子和电子,在电场力作用下,与带电体极性相反的正离子(或电子)趋向其表面发生电中和作用而消电;与此同时,针尖电极流过与带电体极性相同的电晕电流。

根据这一原理,可制成多针放电极、放电刷或放电枪,再与固定的盆地支架组成消电器。放电枪的材料有用导电纤维织成的布、切成锯齿状的导电薄膜或导电橡胶、切成刷状的碳纤维、金属纤维等。

感应式消电器的优点是不需电源、结构简单。缺点是只能对电荷密度很大的带电体才具有消电能力,而且不可能将带电体上的电荷全部消除,总要保留一定数值的残余电荷,故只能用于消电要求不高的场所。此外,其作用范围小,针与带电体间距离只能取 10~20mm。

##### (2) 高压消电器

高压消电器的原理是利用高电压在放电针尖端附近造成强电场而使空气电离。这种消电器是由高压发生器和装有多支放电针的杆所组成。

工频高压消电器是将交流市电由 220V 升高到数千伏至数万伏,然后经高压电缆送到消电器的放电针上,以形成针尖附近的电晕放电。这类消电器使用方便,耗电较低;作用范围较之感应式有所增大,针尖与带电体间距离一般可取 25~35mm。缺点是须经常进行维护,如清除电极管的积灰、更换钝化的针尖。

将直流高压电源直接耦合于放电针上即构成直流高压消电器。由于放电针附近发生的是直流电晕,其中基本不含带相反符号的离子,复合作用不显著,所以消电能力强,其安装距离可增大到 150~160mm。相反,在工频高压消电器中,由于放电针形成的是交流电晕,电晕的极性是不断变化的,所以正离子和负离子的复合作用强。

该消电器的优点是消电能力强、作用范围大;缺点是由于直接耦合的电晕放电器,其短路电流大,易发生火花放电,故电子工业中应慎用。



### (3) 放射性同位素消电器

放射性同位素消电器,是利用放射性同位素在衰变过程中所发出的射线,使周围空气电离成正、负离子,以中和带电体上的电荷。如图 7-6 所示,是由同位素放射源、屏蔽框、保护网等组成的同位素消电器的结构示意图。放射源是  $0.3\sim 0.5\text{mm}$  厚的片式元件,用紧固件固定在屏蔽框底部;该框应有足够厚度以防止射线危害,前面再加装保护网,以防止人员不慎触及放射源,其安装距离为  $20\sim 30\text{mm}$ 。

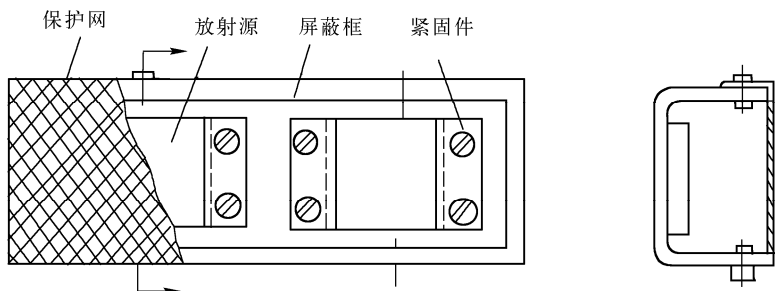


图 7-6 同位素消电器的结构示意图

放射线消电器的优点是不需电源、结构简单、易维护、不发热、不打火。缺点是消电能力差,加之公众对放射性损害的惧怕心理,使其应用受到限制。

### (4) 离子风消电器

以上各种消电器的作用范围都比较小,安装距离近,一般为几十毫米,使它们的应用受到一定限制。离子风(或称离子流)消电器是一种能在较远距离(可达  $1\text{m}$ )起电中和作用的有源电晕装置。

离子风消电器主要由高压直流电源、电晕放电器和送风系统组成。而电晕放电器又是由放电针电极、电极环和电极电阻组合而成。当高压施加到放电针电极后,附近空气发生电离,所产生的离子被放电针电极旁的压缩空气吹送到较远处的带电体上,进行电中和作用。

图 7-7 是一种实际的离子风消电器的结构简图和方框图。图中消电器主体 8 是一个金属圆筒,在筒的侧面装有法兰 9 和套筒 10 作为离子发生器的一个电极;另一个电极是金属针 11,针固定在夹子 12 上,夹子 12 是带电的,和套筒 10 隔开。套筒上的小孔是压缩空气的通道,中间的小孔是消电器使空气电离的排气口。由高压电源 1 提供的电流经导体 3 至夹子 12。导体 3 和主体 8 由插片 5 隔开,在插片 5 上的孔道是通压缩空气的,压缩空气由总管道通过减压阀 7。当向电晕放电器送来的压缩空气压力足够时,压力检测仪给出信号,使时间继电器延时动作启动电源开关。接通给高压电源供电的低压电源,消电器正常工作;而当压缩空气压力不足或发生故障时,压力检测仪发出信号使时间继电器释放,电源开关断开,电晕放电器停止工作。这样就能保证消电器只在压缩空气压力足够时才工作。

另有一种鼓风机式放射性射线消电器,将其安装在鼓风机或排风扇的出口处,可提供大体积低压离子风,以消除工作台面或小室内的静电,臭氧也很少,操作人员可在离子风的环境下工作,这特别适合操作静电敏感度很低的元器件(如 MOS)的生产。

在电子工业中,离子风消电器是应用最多的一类消电器。结合电子工业生产的特点,这类消电器往往具有多种特殊的结构和形式,其功能除直接中和带电体上的电荷外,还可使静电安全工作区的空间始终保持一定浓度的离子数,达到减少尘埃、净化空气的目的。

离子风消电器电气部分消耗的功率小,只有高压消电器的大约十分之一。使用离子风消电器

的注意事项如下：

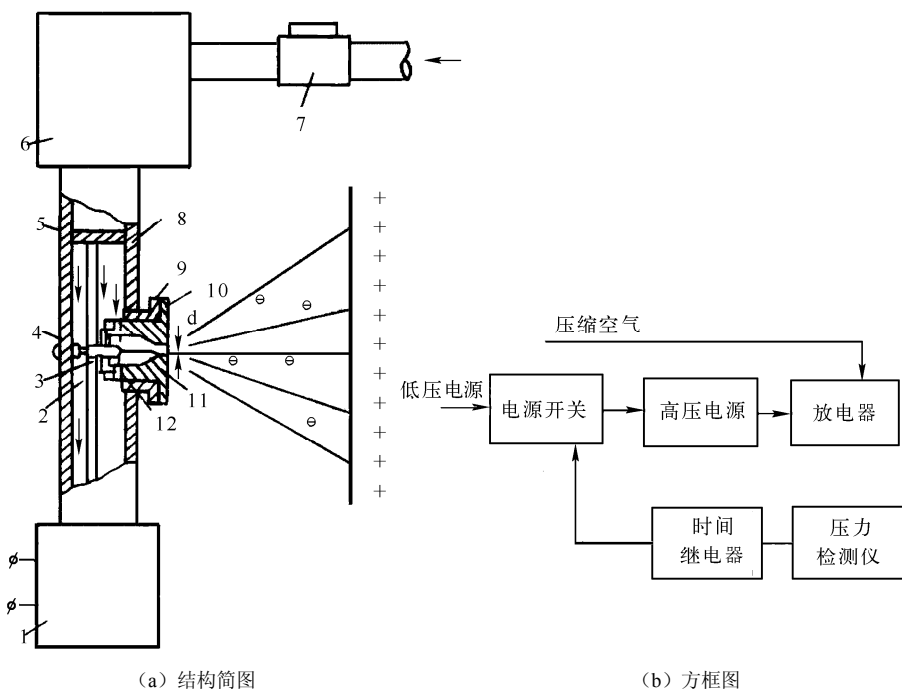


图 7-7 离子风消电器的结构简图和方框图

① 要求使用场所空气洁净干燥，无可见灰尘和油滴，相对湿度低于 70%。

② 安装时应注意：如用金属卡子固定消电器，则固定卡子必须与现场接地系统相连接。所要消除静电的带电体附近应没有金属或其他导体存在，否则，消电效果将大为降低，还可能使带电体产生反带电。消电器要安装在坚固的支撑物或不移动的机械上，并要有良好的接地。消电器的安装角度应使放电针垂直于带电体表面。

③ 在工作前应检查电极的安装位置是否正确、设置距离是否合适、安装角度是否符合规定、放电针有无损伤和消电器接地状态等。此外，对于高压电线是否损伤和电线的安装及连接状态也应进行检查。

④ 在工作中每天应定时检查两次工作电压；还应检查放电针的放电状况、消电效果。

⑤ 放电针应每周清扫一次，方法是：在不接通电源的情况下旋开喷嘴护罩，拔出喷头芯，观察前方小孔内有无尘埃及杂物，孔内放置的电针尖是否偏心太大或针尖受损，如存在上述问题，则需从备件中调换。

⑥ 电晕放电器的绝缘和接地电阻应每月检查一次；高压电源的绝缘电阻每年应检查一次。

### 5. 防静电台垫

在操作 SSD 时，工作台上应铺设防静电台垫，使所有与之接触的 SSD 的端子、工具、器具、仪表、人体等都达到基本均一的电位，并通过适当接地使静电迅速泄放。通常是在垫上装设若干接线端子，用以连接腕带，然后垫子通过电阻接入静电接地干线。

制作这种台垫的主要材料是防静电的橡胶、塑料、金属丝编织物等。防静电台垫种类甚多，现列举几种如下：

(1) 单层结构防静电橡胶台垫 它是在橡胶材料中添加适量的碳黑、金属粉或导电纤维而

制成的。

(2) 三层结构防静电橡胶台垫 其底层橡胶添加导电碳黑, 中层添加导电纤维或直接用防静电织物, 顶层添加抗静电剂或导电粉末。

(3) 三层结构半导体材料台垫 其底层是泡沫塑料或密实的海绵, 中层是导电性织物, 用以接地, 顶层则是具有很低电阻率的半导体乙烯基材料。

(4) 双层防静电复合台垫 它分上下两层结构, 上层电阻率较大, 下层电阻率较小; 其材料可使用防静电橡胶或塑料。

#### 6. 防静电软塑料包装袋

(1) 单面塑料包装袋 在聚烯烃(聚乙烯、聚丙烯)或聚氯乙烯中填充适量碳黑, 使在聚合物中的碳黑粒子形成聚集体, 为泄漏静电形成一个连续通道。由于碳黑的添加量相当大, 薄膜呈黑色, 无法识别其中的盛放物, 使用不方便。

(2) 双面塑料膜包装袋 它由防静电塑料薄膜内层(是在聚合物中添加化学抗静电剂制成的)与一厚度极薄(约为 10nm)的金属外层复合而成。这种袋子既能泄放静电, 又能起到静电屏蔽作用。由于金属膜极薄, 故具有一定的透明性。

(3) 三层结构防静电包装袋 其内层为防静电层, 防止元器件在袋内摩擦积累静电; 中间层为金属导电层, 起屏蔽作用; 最外层又是防静电层, 防止袋子在储运过程中与外界介质摩擦积累静电。

此外, 用化学反应的方法, 可以在塑料薄膜表面形成牢固的金属化合物导电覆盖层。常用的金属化合物有锡、锑、铋的氧化物或铜、银、镍的硫化物或碘化物; 其基体材料可以是 PVC 或聚乙烯(PE)等。化学反应法所得制品的导电层耐久性好, 而且其防静电性能几乎不受空气湿度的影响。

还有一种表面化学改性法, 是使普通塑料包装袋经硫化剂处理后再用碱处理, 使其表面氧化或硫化, 就能获得防静电的效果。这主要是因为硫化剂中能电离的磺酸基等与高聚物表面发生化学键合后, 可显著提高材料的亲水性, 从而达到防静电的目的。这种方法适用于 PE、聚酯类和苯乙烯共聚物薄膜的处理。例如, 将聚烯烃类薄膜经硫化、碱处理后可制成防静电制品。该方法突出的优点是完全不会损坏包装袋的透明度。

#### 7. 防静电硬塑料容器

在电子产品的生产作业中, 各工位、工序之间用于传递和暂时性储放静电敏感元器件和印制板的各种容器, 如元件盒、含多个元件盒的元件架、能插放印制板的周转箱、周转架等, 一般都是硬塑料制品, 使用较多的是 ABS、PE、聚丙烯(PP)等材料, 由于它们具有很高的电阻率, 所以在使用中因接触-分离或摩擦会带上很强的静电, 一般可达 1~5kV 或更高。为此, 必须对普通塑料制品进行防静电处理或用防静电塑料容器代替普通制品。

赋予硬塑料制品以一定导电性能的方法有以下几种:

##### (1) 外部涂敷抗静电剂

改善塑料导电性能的抗静电剂一般均属表面活性剂(SAA)。其抗静电机理, 是利用分子的极化和亲水基吸附空气中微量水分的作用, 在塑料制品表面形成极薄的单分子导电层而构成静电泄放通道。

耐久型外部抗静电剂系高分子电解质和高分子表面活性剂, 以阳离子型和阴阳两性离子型为主。可以用通常方法涂布在塑料制品表面形成附着层; 也可用其单体或预聚物的形式涂布于塑料表面, 然后经热处理使之聚合而形成附着层。由于附着层与塑料有较强的附着力且坚韧, 所以耐

摩擦、耐热，也不会向内部迁移，抗静电性能持久。

外部抗静电剂在使用时应与挥发性溶剂或水先调配成 0.1%~0.2% 的溶液；涂布前先对塑料盒、箱的表面进行预处理，即用水、醇或中性洗涤剂溶液将制品表面的污迹、尘埃等洗净，然后置于无尘室内在 50℃ 以下干燥；涂布时可用棉、毛刷等直接涂敷，也可用喷雾法。

## (2) 内添加抗静电剂

在塑料成型加工中将抗静电剂添加到其中，在制品上会形成抗静电剂分子表面浓度高而内部浓度低的分布；抗静电剂的表面活性越强，就越容易在表面形成强力的单分子层，也就是说，内添加抗静电剂主要依靠它们在塑料制品表面的单分子导电层起作用。在使用、存放过程中，由于摩擦等原因也会导致表面抗静电剂单分子层的缺损，但经一段时间后，制品内部的抗静电剂分子又会不断向表面迁移而使缺损的单分子层得到补充，因而防静电性能逐步得到恢复，这是与外部用抗静电剂最大的不同之处。

改善塑料膜包装袋导电性能的一些表面处理方法，如化学反应法、化学改性法和表面物理改性法原则上也适用于硬塑料制品。此外，用电镀的方法在硬塑料容器的表面镀上一层电阻率较低的金属氧化物薄膜，也是很有发展前景的。

## 8. 防静电烙铁

用烙铁焊接时最大的问题是漏电流（或称浪涌电流）流过元器件时引起的危害，例如，MOS 集成电路在这种情况下可能会发生栅氧化膜击穿或特性恶化。为防止漏电流的危害，一方面是提高烙铁头和电热丝间的绝缘电阻，另一方面是要降低烙铁的供电电压，焊接 SSD 时一般采用 24V 低压供电（也有用 36V 的）。防静电烙铁头应有良好的接地；绝缘手柄上涂敷少量防静电液，每隔 2~3 个月应重涂一次。更为安全的作法是采用断电焊接，可在烙铁上加装一开关，但同时应再连一只发光二极管或氖灯泡。

## 9. 防静电清洗机

装配好的线路板在清洗时，由于采用高绝缘溶液进行超声强化、气相、喷洗等过程，很容易使静电敏感器件如 CMOS 受到 ESD 损害。为此，应使用防静电清洗机。防静电清洗机配有一只专用筐，内部装有接地的导电纤维或导电织物，这实际上相当于一个自感应式消电器，作为放电针的导电纤维靠近带电体时感应出较强的电场而发生电晕放电，电晕区内与带电体极性相反的离子向带电体趋近，并与之发生中和作用而消电。

## 10. 其他防静电用品

(1) 防静电窗帘、贴墙布或贴墙纸 用于制造半导体元器件的洁净车间和精密电子产品的装配间。

(2) 防静电周转小推车 用于周转元器件、半成品等的小车。其车体用金属或防静电塑料制作，车轮应使用导电橡胶制作。

(3) 防静电工作凳 工作椅（凳）面材料可选用防静电织物或防静电海绵、防静电软塑料片、胶板等，也可用上述材料制作成防静电的靠背椅套和坐垫，使用时注意接地。

(4) 防静电清洗液、毛刷 用于清洗、擦拭波峰焊的印制板。

(5) 防静电海绵 用于插装携带 SSD 或用来作 SSD 的包装衬垫。

(6) 防静电胶带纸 波峰焊前用来粘贴印制板上的有关部位。

(7) 防静电胶液 用于防静电胶板之间的粘接或防静电胶板与水泥地面的粘接，也可用作表面涂料。

(8) 防静电维修包 在对含 SSD 的电子设备进行维修时，为防止 ESD 损害，现场维修人员

应携带使用防静电维修包。它包括一块可折迭的防静电地垫、防静电腕带和接地导线。

(9) 防静电真空吸锡器 当拆卸印制板上的元器件特别是集成电路时, 应使用防静电真空吸锡器。该产品由一台小型电动真空泵的主机体和一把专用吸锡烙铁组成。当拆卸元器件时, 只需在焊点熔化后按动吸锡开关, 由于气压差的作用而使焊锡被吸入储锡罐之中。吸锡器有良好的接地, 对 SSD 提供了静电防护。

### 7.2.2.5 防静电工艺要求

#### 1. 静电防护区(点)的一般要求

按照生产作业过程的工艺分工形成的静电防护区及其作业岗位的防静电点, 统称为静电防护区(点)。

(1) 静电防护区根据本作业区所使用器件的静电敏感程度分成第一级、第二级、第三级, 按不同级别制定不同的防护措施。

(2) 作业区的室温应控制在  $15\sim 20^{\circ}\text{C}$  之间, 相对湿度应控制在  $50\%\sim 70\%$  之间, 禁止在相对湿度低于  $30\%$  的环境内放置或操作 SSD。

(3) 一个静电防护区(点)的出入口至多两个, 并视为安全门; 在其门口的醒目位置, 设有永久性的黄底黑字的安全区(点)的名称牌, 并设有永久性的统一的警告标志。

(4) 静电防护区(点)的安全门口, 均应设有地线母线桩, 以供进入安全区的操作人员或其他人员释放自身积聚的静电荷之用。

(5) 静电防护区(点)内, 尤其是工作台上禁止放置非生产性物品, 如餐具、茶叶听、提包、毛织品、塑料制品、鸡毛掸、报刊、橡胶手套、药瓶、圆锥形纸卷等物。

(6) 静电防护区(点)内操作人员所用的图纸、资料, 应装入透明的防静电塑料袋内, 不得使用普通的塑料袋。

(7) 对新进厂人员和第一次涉及静电防护作业工种的人员, 必须事前进行静电敏感器件安全操作的教育, 并取得厂部发给的防静电操作合格证, 然后, 方可进入作业区(点)上岗操作。

(8) 静电防护区(点)内, 必须经常进行高压危害的检查, 以便及时排除有造成人身高压损伤的可能。

#### 2. 作业岗位的静电控制方法与措施

SSD 整形岗位、IC 装(插)入印制板操作岗位、人工焊接 SSD 或焊接印制板岗位、PCB 人工测试岗位, 这些固定岗位约占作业岗位的  $75\%$  以上。固定岗位应采用静电泄漏工艺。一个固定岗位建立一个防静电点, 一条生产作业线组成一个静电防护作业区。

喷雾、清洗、油漆和喷砂设备在喷雾、清洁、油漆和喷砂处理 SSD 器件时, 应该使用适合于防止工作面积内静电荷增加的电离空气压缩机、导电溶剂或电离喷嘴。应该采用湿喷射导电的或抗静电处理的净砂浆来代替干喷砂。

流动岗位包括流水作业线中的故障诊断与修理岗位、静电敏感器件收发料库和某些试验作业岗位。必须配备小型离子发生器, 以减少静电荷的积聚, 达到改善局部环境的目的。当操作者走到某一工位作业时, 必须先将腕带夹到流水线线体接地点上。

#### 3. 防静电厂房的静电控制方法与措施

防静电厂房包括 SSD (包括场效应晶体管, MOS 集成电路, 薄膜电阻等) 的自动测试机房、PCB 在线测试机房、计算机机房、载波机房以及精密电子组装车间等。

防静电厂房, 一般选用吊式离子发生器以充分发挥它的有效工作范围, 达到整个厂房离子平

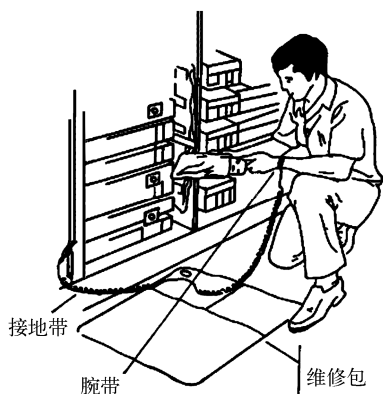


图 7-8 修理作业采用静电维修包示意图

示, 操作者将维修包展开, 利用现场水管等接地建筑物就地接地; 戴好腕带, 工件均应放在维修包上, 按正确方法操作, 就可确保将静电损坏限制在最低程度。

#### 5. 静电敏感器件进厂检验中的静电防护

SSD 的进厂检验包含必要的测试和老炼筛选等工艺, 静电防护的要求如下:

(1) 识别防静电标签、标志。SSD 的生产厂或进口的静电敏感物资, 在 SSD 包装上一般贴有专用标签, 标签通常印成橘黄色以示警戒。这些标签上的图案和文字说明内容, 国内尚无标准, 一般有图 7-9 所示的几种。没有贴专用防静电标签的防静电器件, 原则上应予拒收。

(2) 识别静电保护包装。静电敏感器件进厂时应用导电盒(金属盒、金属隔离器皿、透明导电硬塑料管、导电塑料盒等)封装, 或将集成电路引出脚插在导电塑料海绵上, 或用镀银的裸铜线把管脚绕起来, 使各引脚处于等电位, 否则应予以拒收。



图 7-9 防静电标签

(3) 检验过程中 SSD 的包装不能作任意更改。

(4) SSD 的测试、老炼筛选均应在静电安全作业区内进行, 如果 SSD 的测试机房不具备无静电操作环境条件时, 必须在全接地(人身接地、工作台面接地、仪器设备及工具接地)条件下进行。

(5) 在测试 SSD 时应从包装盒中取一块, 测一块, 放一块, 不要堆在桌面上, 经测试后不合格器件应退库。

(6) 加电测试时必须遵守加电和去电顺序。当信号源和 SSD 不用同一组电源时, 应先打开 SSD 电源电路, 然后打开信号源电源电路。

#### 6. 运输、存储、保管中的静电防护

(1) SSD 在搬运时, 全部引出脚必须处于等电位的金属箔中。金属箔应盛于加盖的金属盒中。对入库的所有 SSD 要检查其包装盒上和入库单上是否有防静电警告符号。

(2) 储放 SSD 库房的相对湿度保持在 50% 左右时为最合适, 不得低于 (30~40)%。

(3) 库房人员应穿防静电工作服或棉织物工作服。

(4) 在存放器件容器的可视位置上, 应贴有防静电专用标签。

(5) 在 SSD 的领、发、收料全过程中, 器件均应在防静电包装容器的交换中进行。在开具领料单时, 亦应在该类器件型号的醒目位置处加盖警告符号。

#### 7. 印制电路板测试过程中的静电防护

(1) PCB 的测试、检验过程中, 需要卸下边缘连接器。当测试完毕后应立即装上, 并及时

衡的目的。所用的离子发生器的数量是根据厂房容积大小和所选取吊式离子发生器的有效范围经核算获得的, 一般留有 30% 的富裕量。离子栅通常用于垂直层流洁净室中, 因为普通离子发生器会破坏层流特性, 影响洁净度。

防静电机房、厂房(车间)的环境, 应由静电分析仪定期测试分析, 存入环境档案, 并根据测试结果, 实施调整与控制。

#### 4. 售后服务中的静电控制方法与措施

在售后服务现场作业中, 静电防护条件较差, 为了达到静电控制效果, 作业中应采用静电维修包。如图 7-8 所示, 操作者将维修包展开, 利用现场水管等接地建筑物就地接地;

放入防静电袋或防静电插件周转箱内。

(2) 含有 SSD 的印制电路板(部件、整件)在加信号测试时,应先接通部、整件电源,后接通信信号源。电源测试结束后应先关闭信号源的电源,后关闭部、整件的电源。

(3) 测试人员在拿取 PCB 时,要手持其边缘部位,不要触及插头部位,严禁测试人员用手或工具去触及印制线条连接 SSD 悬空端的导线。

(4) 测试、检验合格的印制电路板在封装前应用离子枪喷射一次,以消除可能积聚在其上的静电荷。

(5) 温箱应配备接地导流片,以耗散循环空气中的电荷。另外,在温箱内应该使用电离空气,以耗散由于空气流动产生的静电荷,或可以使用屏蔽,使带电空气转向,离开温箱中的 SSD 器件。温箱内的被试零件应置于 SSD 器件保护运输斗内,或置于温箱里接地金属框架上的托盘内。

#### 7.2.2.6 防静电系统工程的管理

电子产品生产过程中的静电防护,涉及从静电敏感器件选型订货、进厂验收、装焊成产品到包装出厂的生产全过程。涉及领导、车间、技术管理等各个部门和各类人员的参与和配合。

##### 1. 有关部门领导及管理人员的职责

###### (1) 工厂企业领导的静电防护职能

- ① 应该认真学习静电防护的基础知识。
- ② 从工作上和经费上支持本单位各部门制定、贯彻并落实静电防护的有关措施和规章制度。
- ③ 尊重本单位有关专家的正确意见,采取合理有效的防护措施。
- ④ 定期召开静电防护工作交流会、评审检查会、表彰先进,促使其健康发展。
- ⑤ 协调各有关部门,定期研究,落实本企业的静电防护计划和措施,解决静电防护工作中出现的问题和困难。

###### (2) 生产车间与质量管理部门的静电防护职能

- ① 对与静电防护有关的人员进行经常性的静电知识教育和培训,提高对静电危害及静电防护必要性的认识。
- ② 将静电防护作为安全生产和质量保证的制度,纳入正常的生产管理中,严格按照静电敏感器件的产品设计文件和工艺规程组织生产,进行评估验收。
- ③ 对生产线上防静电工作区(点)的防静电设施的接地和连接可靠性定期组织进行维护和校验,保证防护效果的有效性和防护的安全性。
- ④ 车间、工段(或小组)和质量管理部门要设专人负责此项工作,并定期向主管厂领导或总工程师报告各生产工序的静电防护中的问题和建议。

###### (3) 产品设计部门的静电防护职能

- ① 产品设计师要熟悉静电敏感器件的型号、种类、内部结构、静电损坏原理、技术指标及其防护的方法和措施。
- ② 在下列设计文件上对 SSD 做出明显的警告标志和说明,并根据需要规定出该组件、部件以及整机的静电防护要求,作为产品设计工作和技术要求的组成部分。这些设计文件有:含有静电敏感器件的电原理图、装配图、明细表、技术(使用)说明书、维修手册、调试检验说明(包括进厂检验、老炼筛选条件、工序检验、老炼说明书、例行试验文件)、外购件汇总表、印制版图(引出端头处理)、外购(协)的技术协议书和产品返修说明书等。

③ 在采用 MOS 等敏感器件时,从线路设计上采用增加保护。电路等措施,提高其产品静电防护能力。

④ 配合车间和质量部门督促检查生产过程中执行静电防护措施、满足产品设计要求的情况。

#### (4) 工艺技术部门的静电防护职能

① 为生产过程各工序提出并采取完整有效的静电防护措施,编制静电工程计划和施工方案。

② 建立合理的静电防护接地系统和供电系统,防止二者的相互干扰。

③ 不断采用静电防护的新技术、新材料和新设施;不断完善静电防护设施,降低成本,提高防护效果。

④ 编制静电工程各工序的静电防护操作规程,有关工艺文件和规章制度。

⑤ 协助人事教育部门进行静电防护知识教育。

#### (5) 标准化机构在静电防护工程中的职能

① 对设计文件、工艺文件进行标准化审查时,要全面检查,涉及 SSD 使用性的文件,检查其是否按标准规定标志静电警告符号和静电警告字句。

② 编制对设计文件、工艺文件审查时有关 SSD 的审查要求与内容。

③ 编制企业设计文件和静电防护区中使用的静电警告符号标准。

④ 贯彻《电子产品防静电放电控制大纲》等标准及有关国外先进标准。

⑤ 编制本企业有关静电防护的标准和文件。

#### (6) 物资供应部门的静电防护职能

① 物料供应人员,尤其是采购人员要熟悉静电敏感器件的型号、品种、标志方法和一般电子工业防静电系统工程的管理保护常识,以便做好必要的静电防护准备。

② 计划和采购人员,在审查外购件汇总表时,如果发现未标志静电警告符号的 SSD 时,应及时通知设计师予以改正。

③ 采购人员在采购任务书、订货合同、外购件技术协议书上凡属 SSD 型号的旁边位置,应标注警告符号。

④ 物料采购、供应人员不准任意对 SSD 的原封装进行拆除。

⑤ 检查 SSD 包装是否原封。如已拆封,要检查包装内器件有无金属材料保护物,保护物是否完好无损。如果金属保护物已拆开或损坏,应立即向发货单位提出调换或索赔。

⑥ 检查包装件上是否有醒目的静电警告符号。若无,或与本厂使用的标准警告符号不一致时,供应人员应在包装上加盖本厂使用的警告符号,以便工厂有关部门识别。

⑦ SSD 的送检单上应盖有警告符号章。

#### (7) 质量检验部门静电防护的职能

① 检验、试验人员(包括外购件进厂检验、试验和产品检验人员)应熟悉静电敏感器件的型号、性能和防护知识。

② 检查送检的 SSD 的包装件和送检单上是否有警告符号。若无,应立即查清原因,补盖警告符号后,才能进行验收工作。

③ 检验、试验人员必须严格按采用 SSD 的有关设计文件、工艺规程进行检验和试验,严格在静电防护区内进行作业。

④ 经检验合格的 SSD 应仔细妥善包上金属保护物(或放入原包装内)。若原封装已拆封破损,应予以调换。在入库前,要检查包装件上的警告符号是否完善,缺损的要加盖,同时在送库



单上的醒目位置盖以警告符号。

⑤ 随时监督生产过程中有关静电防护的工艺规程贯彻执行情况。

(8) 生产部门(含外协)在静电防护工程中的职能

① 生产管理人员要明确静电防护对产品质量和企业经济效益的重要意义,熟悉静电防护常识。

② 按设计工艺文件的要求,下达生产作业计划(含辅助作业计划)和组织管理生产。

③ 设立防静电专用半成品或成品库,制定专项管理制度并实行管理。

④ 生产部门的外协加工人员,要认真消化产品图纸、设计文件和工艺文件中的静电防护要求,熟悉产品所含的静电敏感器件的型号和种类。在对外签订的外协加工合同、图纸和外协技术协议书上均要注明静电防护的警告标志或说明。其加工成品的进厂验收、保管等事项均按前述有关规定执行。

(9) 设备、动力部门在静电防护工程中的职能

① 按工艺部门提出的防静电接地要求,埋设地桩,敷设防静电地线和电源线。

② 按工艺部门制订的静电防护区(点)布置图,铺设厂房内的地线母线。

③ 按工艺部门制订的工艺流程图中的静电控制点,在生产线体上安装接地柱、防静电桌面、地垫等项设施。

④ 按工艺部门制订的工艺布置图,安装离子发生器及其系统和其他抗静电设备。

⑤ 对静电防护区的厂房湿度进行控制和管理。

(10) 工具、工装部门在静电防护工程中的职能

① 根据工艺部门提出的项目,购置并管理工厂业务分管的防静电器材项目,如防静电吸锡器、低压电烙铁、离子枪等工具。

② 根据工艺部门提出的任务书,设计和制造防静电用工装,并实行管理。

(11) 仪器计量部门的静电防护职能

① 根据工艺文件规定,购置并管理静电控制、静电计量和环境温度湿度等计量仪器。

② 根据工厂规定,定期校验、维修静电防护仪器仪表,保证其使用的有效性和可靠性。

③ 指导车间正确使用静电计量仪器。

④ 对含静电敏感器件的仪器仪表的修理、校验及管理人员,进行必要的静电防护知识教育。

(12) 基建部门在静电防护工程中的职能

① 按照工艺部门提出的有关厂房工艺布置的安排和要求,应设计具有主体布局的整套防静电设施(如相对湿度环境控制等)、静电接地专用线和防静电地面。

② 在厂房的施工和竣工验收中要重视静电设施的验收,并征询工艺部门的意见。

③ 在厂房的建筑和装修中,对有静电防护要求的生产厂房、实验室等,尽可能(兼顾经济条件)采用抗(防)静电材料,以改善其环境的静电防护性能。

(13) 技安部门在静电防护工程中的职能

① 配合工艺部门,对生产操作环境进行静电带电的测量,并尽量净化静电环境。

② 为静电防护区(点),配备符合防静电要求的劳动保护用品,如防静电工作服等。

③ 将静电安全作为技术安全和生产安全的重要课题来进行管理。

④ 协助车间搞好静电防护设施和工艺的评价考核工作。

(14) 人事、教育部门在静电防护工程中的职能

① 负责对工厂全员进行防静电危害意义的教育,并把防静电基础知识和防静电工艺规程作

为生产工人技术考核的重要内容之一,对进行含有静电敏感器件作业的一线工人经书面闭卷考试合格后,发给上岗合格证,贴上 ESD 标签。

防静电教育应由专人(或专门部门)负责,事前要制订培训计划,准备培训教材和演示教具,要事先请好专业教员。培训课程主要包括静电产生原理和静电危害、静电防护的基本原理和方法、主要防静电器材的性能与使用方法、主要防静电控制仪器和测量仪器的使用方法、静电防护区的基本要求以及静电防护区实际操作。

② 培训静电安全专业技术骨干。

③ 对静电安全工作方面作出成绩的单位和个人,要实施奖励。

④ 对为实行静电安全操作而增加工时的工序其劳动定额要给予重新核定。

## 2. 质量管理的主要内容和质保体系

### (1) 静电分析

静电分析是制订企业静电防护计划和进行静电放电控制工程设计的重要阶段,静电分析包括对产品进行的分析和对企业环境静电场(源)的分析。

#### ① 产品分析的内容。

a. 对 SSD 及由 SSD 构成的产品进行分类、分级,列出清单,划出分布区,统计 SSD 的流量、流向及库存周转情况。

b. 对产品结构中可能存在的静电互连或感应状况做出分析处理。

c. 对产品的测量仪器、试验设备在使用中其本身的静电放电或静电防护要求做出分析和处理。

#### ② 环境静电场(源)分析的内容。

a. 对 SSD 或含有 SSD 产品的生产作业环境和存放库房的温度、湿度及其年变化状况进行统计分析,找出规律与恶劣点。

b. 对企业在产品变更中有可能存在的静电源应做出正确估计。

### (2) 产品的静电防护性能设计

在产品设计(包括系统设计、电路设计、结构设计、包装设计及工艺设计)过程中,凡涉及静电防护设计的技术文件、管理文件以及 SSD 本身的位置都要作出专门标记,规定技术要求,提出技术规范。

#### ① 设计文件。

a. 在电原理图或逻辑图中,对于已采用了输入端保护网络,同时进行了直接接基本地的 SSD,应在规定位置标出静电警示符号。

b. 印制板设计中 SSD 输入端的走线要尽量避免靠近边缘,对栅极输入端应实行保护。

c. 对涉及 SSD 的明细表、装焊图、外购件汇总表、调试检验说明、物资器材清单等文件应在规定位置标出静电警示符号,作为操作者、管理人员、采购人员注意和妥善保护静敏器件的依据。

d. 在产品技术说明、维修指南或安装操作说明的有关部位,要做出静电警示标志,避免 SSD 产品处于非保护状态。

e. 包装设计图纸的有关部位也要做出特别标记。

② 工艺文件。静电防护的基本工艺文件主要有企业静电防护的专业工艺规程、静电安全作业区(点)的操作卡、检验卡及静电作业岗位的器件配置明细表等。

a. 工艺文件目录及其他相关文件中,在有关静电安全的文件和防静电条款的明显位置,应标注防静电符号,以提醒使用人员注意。

- b. 在静电防护专业工艺规程和防静电守则等专业文件的封面或首页, 应标志静电警示符号。
- c. 结合新建、扩建、技术改造或技术措施, 应一次性完成静电防护的整套设施建设, 涉及的施工安装图必须明确技术要求, 竣工时必须作为工程验收条件之一。
- d. 防静电工程的配置器材, 应该是定点厂生产的, 以确保静电防护的效果。
- e. 工艺文件中涉及的防静电检查、测试条款时, 应明确仪器、设备的防静电要求, 有时也需要指定仪器、设备。
- f. 静电防护的生产技术文件, 包含对所应用的静电控制防护器材安全使用的检查和测试文件。

### ③ 标准化。

- a. 制定和贯彻执行 ESD 控制的标准, 积极推行有关静电防护的国外先进标准。
- b. 对设计文件、工艺文件进行标准化审查时, 所涉及的防静电条款应予以重点审查。
- c. 静电工程设计、施工与验收。

### (3) 工程设计的内容

- ① 根据生产环境和产品的静电防护特性, 确定静电控制方案及防护途径。
- ② 依据工艺方法及要求, 选择静电防护器材和静电监测与测试仪器, 分别列出分类清单和器材管理方案, 并推荐生产厂家。清单一般包含器材名称、规格、数量、价格、生产厂家, 并注出主要技术参数; 静电防护器材、静电监测与测试仪器的管理方案中, 应明确类别和分项明细表, 规定归口管理部门, 使静电器材的供应与管理正常化。

### ③ 工程的验收。静电工程的竣工验收, 一般要达到如下标准:

- a. 静电安全作业区或生产线应具有明显的静电区域界限和静电符号标记。
- b. 经验收测量, 工程所有项目应满足防静电指标。
- c. 工程安装全部满足图纸要求。
- d. 静电防护的手段具有监控功能。
- e. 工程工艺性好, 具有可使用性, 并且较为方便。
- f. 技术方法和实施指导文件完整, 具有可执行性。
- g. 操作、管理人员具有培训考核资料。
- h. 具有管理条例。

### (4) 静电防护管理是企业管理的重要内容

静电防护的计划、技术、物料、资金、资料等均应纳入企业的正规管理渠道。除正常的设计、工艺文件外, 企业的静电管理条例主要包括下列文件:

- ① 静电控制方面的企业标准。
- ② 静电防护守则。
- ③ 关于静电防护职能的规定。
- ④ 关于静电防护器材的供应与管理方法。

### 3. 防静电工程计划的制订与修改

企业防静电工程计划由工艺部门配合计划部门制订下发, 执行情况由计划部门组织考核。计划的修改应取得工艺部门的合作, 确保计划的完善和较好的实施效果。

防静电系统工程的实施是由企业的最高技术负责人领导, 实施过程中涉及的主要部门包括设计、工艺、车间、计划生产、质量检验、动力设备、标准化、物资供应、工具工装、计量、教育、人事劳资、技安环保、基建、外协及分析试验等。

## 7.2.3 电源干扰控制技术

### 7.2.3.1 电源变压器防干扰措施

高频尖峰脉冲在变压器中的主要传播途径由一次、二次绕组间的分布电容所构成。由于一次、二次绕组靠得很近，它的分布电容在几百皮法左右，不仅容量大，而且有十分好的频率特性，对高频噪声有很低的阻抗。

#### 1. 采用静电屏蔽方式减少分布电容

(1) 在一次、二次绕组之间加屏蔽层并接地 制作过程中在绕制完一次绕组后，用铜箔包一层，铜箔始末端须有重叠部分，且重叠部分要相互绝缘，如在这样的屏蔽层上再加一层，两层屏蔽之间也绝缘，则效果更好。另外要求屏蔽层引出线与屏蔽层的接触电阻很小，有时直接利用屏蔽层铜皮作引线，以保证接触可靠。

在工艺设计时还可以降低残存分布电容。例如，在绕制时，将绕组宽度绕窄一些、屏蔽层尽可能宽一些，使泄漏的电力线变得更少。

(2) 隔离变压器 为防止电网中噪声进入电源部分，可设置变压比为 1:1 的隔离变压器。为进一步提高抗干扰效果，应把一次、二次绕组屏蔽层与铁芯均接地。

(3) 多层屏蔽变压器 当对抑制电源共模噪声有较高要求时，可采用多层屏蔽变压器，如图 7-10 所示。其中，将一次绕组屏蔽后与铁芯及机壳相接后接地。二次绕组采用两层屏蔽，内屏蔽层与测量电路的模拟地相接，外屏蔽层与测量电路的内屏蔽层金属壳相接。输出传输线采用有外屏蔽层的电缆且两点接地，其外屏蔽层一端与内屏蔽层金属壳相接，在信号源一端与信号源的地相接。

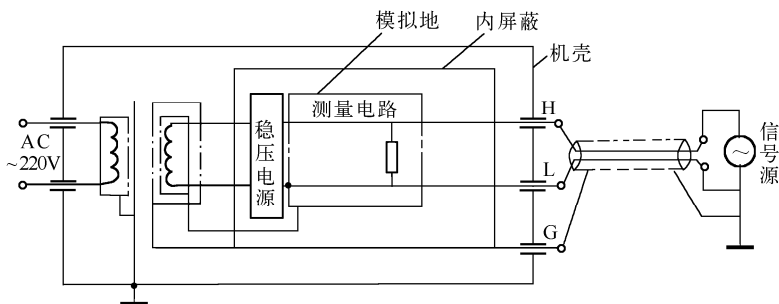


图 7-10 多层屏蔽变压器

#### 2. 改变变压器绕制方式，降低共模噪声

(1) 采用一次绕组平衡式绕法 平衡式绕法是将一次绕组分成两部分绕制，使漏电流减小，以减小共模电压。一般绕法是来回绕制，线匝之间有 220V 的电位差，通过两匝之间的分布电容产生较大的泄漏电流。采用平衡式绕法时，线匝之间只有原来的一半电位差，泄漏电流较小。

(2) 采用 EI 型铁芯绕组绕法 电源变压器的线轴构造对抑制共模电压也有影响。使用 EI 型铁芯，一次绕组和二次绕组分别绕在两个线轴上，效果更好。

#### 3. 减少电源变压器泄漏磁通的措施

电源变压器的泄漏磁通会干扰电子线路。特别是在微小信号的放大电路中，会造成更严重的影响。为减小漏磁通可采取以下措施：

(1) 改进绕线工艺 绕法不同, 泄漏磁通的大小也不同。两种不同的绕制方法如图 7-11 所示。图 (a) 是泄漏磁通多的绕法, 因一次绕组和二次绕组位置差别太大, 各自发出的磁通分布也相差太大, 使泄漏磁通较大。图 (b) 的一次绕组和二次绕组均在左右铁芯上绕相同的匝数, 然后各自并接, 可使泄漏磁通大大减小 (串接也有相同效果)。

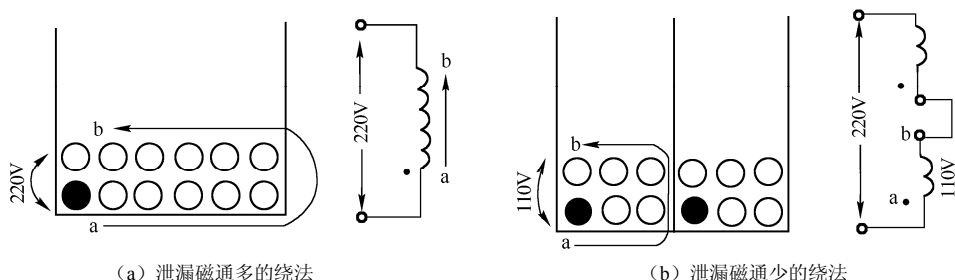


图 7-11 两种不同的绕制方法

(2) 屏蔽电源变压器 屏蔽电源变压器的方法有多种, 常采用的方法为在变压器周围包一层铜皮, 其两端焊接, 形成一个短路环, 变压器的泄漏磁通被短路环产生的短路电流所抵消, 以减小泄漏磁通。

(3) 采用合适的装配法 电源变压器在装配时也应充分考虑到它的泄漏磁通影响。加大它与受干扰的线路之间的距离, 可有效地抑制这种磁通干扰。

#### 4. 噪声隔离变压器

噪声隔离变压器是近年来研制的一种抗干扰电源变压器, 它是在绝缘变压器的基础上, 在绕组与变压器的外部设有多层电磁屏蔽, 其铁芯材料的磁导率在高频时会有急剧下降的特性, 这样就能有效阻断高频噪声的磁耦合。

### 7.2.3.2 电源滤波器

电源滤波器是以市电频率为通带的低通滤波器, 一般由电容或电感组成。电源滤波器不仅可接在电网输入处, 以抑制电网中输入的噪声, 也可接在噪声源电路的输出处, 以抑制噪声输出。它既可接在交流输入、输出端, 也可接在直流的输入端和输出端。

电源滤波器本身也有屏蔽和屏蔽接地问题, 它只有在外层屏蔽罩以及应接地的电容可靠地低阻抗接地, 效果才会好。

### 7.2.3.3 串联调整式稳压电源的抗干扰措施

#### 1. 抑制穿过稳压电源的电网噪声

(1) 调整管用高频管以抑制高频噪声 串联调整式稳压电源对高频噪声抑制能力差。因调整管一般用低频三极管, 其集电极与发射极间分布电容有  $20 \sim 200\text{pF}$ , 高频噪声很容易通过分布电容进入已稳压的电源上; 串联的脉冲噪声仍有几分之一到几十分之一幅度的残余脉冲输出。采用高频管用作调整管, 其抑制噪声效果较好。

(2) 负电源调整管正确接法 在实践中发现负电压输出的稳压电源, 当调整管放在接地一侧时, 其抑制噪声性能很差。

(3) 消除滤波大电解电容的等效电感 电解电容采用卷状结构, 本身等效电感很大, 所以对高频噪声并不形成低阻抗通路。消除办法是并接  $0.1\mu\text{F}$  左右、高频特性好的陶瓷电容。

## 2. 抑制稳压电源本身噪声

(1) 在负载与稳压电源输出端距离较远时,一定要用双绞线方式,以减少来自变压器泄漏磁通引起的纹波电压。

(2) 在分立元件电路中,稳压管的工作电流会产生无规则噪声。电流越小,噪声越大,有时可达几百微伏到几十毫伏。设计时应做到确保较大工作电流,并接旁路电容,可将噪声衰减 80% 以上。

### 7.2.3.4 开关稳压电源的抗干扰措施

#### 1. 开关稳压电源噪声的三种形式

(1) 返回式噪声 即返回电网中去的噪声。它往往通过电源变压器传播到电网中去,对附近电网上工作的电子设备形成强烈干扰。

(2) 输出噪声 可分为共模噪声和差模噪声,抑制重点为共模噪声。

(3) 辐射噪声 即高频噪声以电磁波方式辐射干扰其他电路或开关电源内部的电路。

#### 2. 电路和器件的选择

一个关键点是保持  $dv/dt$  和  $di/dt$  在较低水平。有许多电路通过减小  $dv/dt$  和/或  $di/dt$  来减小辐射,这也减轻了对开关管的压力,这些电路包括 ZVS (零电压开关)、ZCS (零电流开关)、共振模式 (ZCS 的一种)、SEPIC (单端初级电感转换器)、CK (一套磁结构,以其发明者命名) 等。

使用软开关技术,虽然会稍微降低效率,但在节省成本和滤波或屏蔽所占用空间方面有更大的好处。为了保护开关管免受由于寄生参数等因素引起的振荡尖峰电压的冲击常需要阻尼。阻尼器连到有问题的线圈上,可以减小发射。阻尼器有多种类型,从防干扰角度看,RC 阻尼器通常是最好的,但比其他的发热多一些。权衡各方面的利弊,在缓冲器中应谨慎使用感性电阻。

#### 3. 整流二极管反向电流产生噪声的抑制

减小噪声干扰,要求二极管反向恢复时间短及具有软恢复特性;措施之一是加缓冲器,即在续流二极管上并接 RC 电路;措施之二是加缓冲器和电感。

高速开关二极管结电容小,如选用型号为 SBD、FBD 的高速开关二极管,可达到同时兼有低噪声和高效率的目的。

#### 4. 用铁氧体磁珠滤波器抑制高频噪声

铁氧体磁珠滤波器具有价格低廉、使用方便、滤除高频噪声效果显著等优点,因而得到广泛应用。当导线中流过的电流穿过铁氧体时,铁氧体对低频电流几乎没有什么阻抗,而对较高频率电流却会产生较大的衰减作用,高频电流以热量形式散发,其等效电路为 L 与 R 相串联,两元件值与磁珠长度成正比。

磁珠种类很多,其重要的技术性能是阻抗频率曲线。铁氧体磁珠上有多个孔洞,增加导线穿过磁珠孔次数可增加元件的阻抗,其值为穿过磁珠次数的平方。在实际应用中,高频时通过多穿孔数来增加抑制噪声能力不可能达到预期值,因为增加导线圈数反过来会耦合到周围的交变电场,而用多串联几个磁珠的方法效果会好一些。

磁珠不仅用于电源电路中滤除高频噪声,也可用在数字电路中。数字电路中脉冲信号含有频率很高的高次谐波,它是高频辐射的主要根源。超小型磁珠可方便地让集成电路、晶体管等元件引线穿过。实验证明,经过磁珠后的方波脉冲变得更正规,原来叠加在上面的高频振荡波形噪声均被滤除。

需注意的是电感和变压器的磁路要闭合,例如,采用环形或无缝磁芯。环形铁粉芯适合于存

储磁能的场合,若在磁环上开缝,则需一个完全短路环来减小寄生泄漏磁场。

初级开关噪声会通过隔离变压器的线圈匝间电容注入到次级,在次级产生共模噪声;这些噪声电流难以滤除,而且由于流过的路径较长,便会产生发射现象。一种很有效的技术是将次级地用小电容连接到初级电源线上,从而为这些共模电流提供一条返回路径;但要注意安全,千万别超出安全标准标明的总的泄漏地电流,这个电容也有助于次级滤波器更好地工作。线圈匝间屏蔽(隔离变压器内)可以更有效地抑制次级上感应的初级开关噪声。虽然也曾有过五层以上的屏蔽,但三层屏蔽更常见。靠近初级线圈的屏蔽通常连到一次电源线上,靠近次级线圈的屏蔽经常连到公共输出地(若有的话),中间屏蔽体一般连到机壳。在样机阶段最好反复实验,以找到线圈匝间屏蔽的最佳连接方式。

以上两项技术也能减小输入端上感应的次级开关噪声。适当大小的输出电感可以将次级交流波形变成半正弦波,因此可以显著地减小变压器绕组间噪声(直流纹波和噪声)。但这仍将在波形不连续处产生噪声干扰,比较好的方法是采用适当大小的两边绕线的磁性元件,这样便可在次级得到无噪声的完整正弦波,还能改善直流纹波和噪声,同时也能减小发射。

### 5. 改进装配工艺抑制噪声

#### (1) 印制板设计制作

为降低成本,开关电源控制电路放在一次绕组侧为好,但这样会使一次绕组开关工作的主电路与控制电路处于一起,控制电路极易受主电路的影响。为此在设计制作印制板时,主电路与控制电路尽量分离,但要做到严格分离是很困难的。设计时,应特别注意地线公共阻抗的影响,控制电路不能借用主电路的地线。

与串联调整式稳压电源一样,开关电源放大器的输入阻抗较高,很容易因电磁感应拾取噪声。在设计制作放大部分印制线路时,要注意其构成的环路面积要小,取样线要尽可能短以及远离噪声源线路。

#### (2) 电源装配布线

电源装配布线对共模噪声有很大影响,抑制共模噪声除加旁路电容之外,还可采取以下措施:

① 在装配时请注意:电源及布线的分布电容要小。这样可减少内共模噪声向差模噪声的转化,因对电路起干扰作用的往往是差模噪声。

② 和其他稳压电源一样,电源的输出线不能与交流功率及其他大功率负载线相接近或平行,更不能捆扎在一起。

③ 开关电源内部布线不要前后级混杂捆扎。

## 7.2.4 电缆线防干扰技术

电子控制设备的特点之一是大量的电力、信号和接地电缆只能集中在有限的空间内敷设,如柜内和设备之间的电缆槽、电缆架等。如果处理不当,带有强噪声的电力电缆和控制电缆很容易对信号电缆产生静电或电磁感应,信号电缆间也可能发生串扰。这是一个十分重要而又往往不为人们所重视的问题。

### 7.2.4.1 电缆回路分类和电线选择

#### 1. 电子设备中的电缆回路分类

电子控制设备中的各种回路在传递的能量、电平、速度和干扰敏感度等方面有很大差异,应该首先作回路分类,按其不同特点分别选用合适的电缆和敷设方法。

(1) 大功率电力回路 指 3~6kV 以下, 500V、200A 以上的交直流电力回路。这类回路是强干扰源, 如大容量交流电动机电力回路等。

(2) 低压电力回路 指 500V、200A 以下的交、直流电力回路。这也是强干扰源, 如小型电动机电力回路、照明配电回路、控制电源回路等。

(3) 控制回路 只限于有触点控制回路。如触点控制的继电器线圈、电磁阀、信号灯、蜂鸣器等回路, 这类回路虽然功率不大, 但也是强干扰源, 不过可以采取措​​施, 降低其干扰发送量。

(4) 高电平模拟回路 指 0.1~10V 的模拟量信号及其调节回路。这类回路一般不产生干扰, 也不易受干扰影响, 如计算机模拟量输入和输出回路等。

(5) 低电平模拟回路 指 0.1V 以下的模拟量回路, 很易受干扰影响。大多是测量回路, 如热电偶测温回路等。

(6) 高抗干扰数字回路 指一般的开关量、数字量回路, 既受干扰影响, 又能对敏感电路形成干扰, 如 24V 和 48V 输入/输出回路等。

(7) 低抗干扰数字回路 指计算机及其外设等的通信回路。这类回路对干扰很敏感, 如计算机与现场 CRT 终端间的通信回路等。

2. 电缆选择原则

选择导线电缆, 是根据传输信号电平或功率电平、频率范围、敏感情况、隔离要求等指标来确定, 只有分析信号电平与波形, 才能正确选用导线电缆。一般原则如下:

(1) 电源线, 如 380V 交流、220V 交流、27V 直流, 一般不用屏蔽电缆, 但电源线干扰大时例外。

(2) 低频信号线, 对隔离要求很严格的多点接地和单点接地线路, 用屏蔽双绞线。

(3) 单点接地的音频线路和内部电源线, 用双绞线。

(4) 在重要发射射频脉冲、高频、宽频带内阻抗匹配等处, 用同轴线。

(5) 数字电路、脉冲电路, 用绞合屏蔽电缆, 有时需要单独屏蔽。

(6) 高电平电源线, 用镀锌钢管屏蔽。

(7) 多点接地的音频或电源线, 需要用屏蔽线。

(8) 低频仪表可用单芯、单屏蔽导线。当传输中等信号电平并有良好接地系统时, 效果比较好。

3. 合理选择各种电缆

根据上述原则, 按不同用途电缆的选择可按表 7-1 进行。

表 7-1 推荐选用电缆表

电 路	EMC	推荐采用电缆
主交流电源到设备 3 相	P	三芯或四芯绞股不屏蔽电缆
主交流电源到设备 单相	P	双绞股不屏蔽绞线电缆
主直流电源到设备	P	不屏蔽双股绞线电缆
交流二次电源到设备 3 相	P	三芯或四芯不屏蔽绞合电缆
二次直流电源设备	P	双股绞合裸线电缆
配电布线	P	双股绞合或单股裸线电缆
从设备到电源引线	P	绞合电缆, 有时可能需要屏蔽电缆
大于 5A 加热或阻性负载	Y	绞合不屏蔽电缆
小于 5A 的照明负载	Y	单根裸导线
低于 5A 的感性负载	E	单根导线, 有时需要屏蔽线



续表

电 路	EMC	推荐采用电缆
大于 5A 的感性负载	E	绞合屏蔽电缆
数字电路	S	绞合屏蔽, 有时需要逐根单独屏蔽
所有形式的脉冲电路	E	绞合屏蔽电缆, 有时需各股单独屏蔽
模拟电路	S	绞合屏蔽电缆
同步电动机, 励磁绕组	E	三股或两股绞合不屏蔽电缆
同步电动机, 信号电路和接头	S	双股绞合屏蔽电缆
同步电动机, 输出及分析仪	S	双股绞合屏蔽电缆
伺服直流放大器电路	S	双股绞合全部屏蔽电缆
伺服保护电路	S	双股绞合全部屏蔽电缆
所有类形的低电平信号	S	双股绞合屏蔽电缆, 有时逐根单独屏蔽
火警系统	S	双股绞合屏蔽电缆, 有时逐根屏蔽
燃油油量检测用电缆	S	同轴电缆
通信天线馈线	E	同轴电缆
视频电路	S	同轴电缆
通话电路	S	双股绞合, 总屏蔽单根屏蔽电缆
所有指示器电路	S	同轴电缆
雷达发射传输线	X	波导

表中: P 类——交流电源线、二次电源线、配电线等。Y 类——低电平的阻性负载线、照明线等。E 类——设备电源输出线、感性负载、脉冲电路等。S 类——低电平信号线、视频信号线、低频控制线、音频信号线、油表导线、通话系统线、同步信号电路等。X 类——射频电源线、军械专用线、数字传输线、天线馈线等。

### (1) 普通控制电缆

普通控制电缆是控制设备中用得最广泛的电缆之一。通常采用多芯电缆, 可以集中地连接多个属于同一种类的控制回路或信号回路。它们的芯线有一定扭绞(称为同心绞), 但绞距太大对抗干扰并没有明显作用。

### (2) 对绞电缆

对绞电缆, 又称为双绞线或绞线。电缆中每两根芯线以较小的绞距(如 20~50mm)扭绞在一起, 然后, 几对绞线同心绞合在一起构成一根对绞电缆。绞线对抑制磁耦合有很的好效果, 例如, 节距为 5cm 的双绞线能对磁耦合干扰产生约 40dB 的衰减, 而一根普通的 1 英寸(2.54cm)钢管仅能产生约 27dB 的磁耦合衰减。同时双绞线对称性优于普通控制电缆、屏蔽电缆或平行导线, 有助于构成平衡电路, 减少不对称干扰的耦合, 所以双绞线和对绞电缆广泛用于强干扰回路和敏感回路的配线, 特别是晶闸管变流装置等磁干扰较强的场合和高速敏感数字装置。

此外, 由于双绞线能抑制噪声的发送, 所以在装置的内部配线和外部连线中都广泛使用。例如, 单相电源和负载配线常用双绞线, 三相电源常用三绞线等。

实践经验证明, 双绞线对磁干扰有优良的抑制作用。一般情况下, 用双绞线已足以抑制磁场干扰, 只是在有特强低频磁场的空间, 如大电流电解装置和感应加热炉等的附近, 才需要附加钢管等磁场屏蔽措施。

### (3) 屏蔽电缆

以铜或铝为屏蔽层的屏蔽电缆能抑制高频电磁场干扰, 屏蔽层接地后还能抑制变化电场对芯线的静电感应。

① 按屏蔽层划分,屏蔽电缆有下面几种。

a. 铜丝编织屏蔽电缆。用带镀层的细铜丝编织层构成屏蔽层,制造简单,缆体柔软。是最普通和最常用的屏蔽电缆。屏蔽效果随编织物覆盖率的增加而提高,一般覆盖率在 90%以上。但是由于编织层随时间的增加而逐渐氧化,编织导线间的接触电阻变大,屏蔽效果随之减小。

b. 金属带屏蔽电缆。用钢带包绕芯线构成铜质全密封屏蔽层,屏蔽效果好,可是工艺复杂,柔性差,价格昂贵。

c. 镀膜屏蔽电缆。镀膜屏蔽电缆用镀铜(或镀铝)的塑料薄膜作为屏蔽层,屏蔽效果和柔软性都好,为便于镀金属膜接地,还带行一根接地用导线。一般模拟回路和数字回路广泛采用编织屏蔽电缆,只在计算机通信、低电平传感器等低电平、高敏感的回路中才使用铜膜屏蔽电缆。

② 按电缆结构划分,屏蔽电缆有下面几种。

a. 总屏蔽电缆。即最普通的屏蔽电缆,只有一个外屏蔽层,内部有的是单芯,有的是两芯,有的是多芯。多芯适用于成组传送信号的线路。

b. 总屏蔽对绞电缆。芯线为一对或多对双绞导线,外有一层屏蔽层。这种电缆既能抑制磁场干扰,又能抑制电场和电磁场的干扰,所以多用它传送有较高要求的信号。

c. 内屏蔽(对绞)电缆。每对芯线(或对绞导线)都有各自的屏蔽层,有时外面还有一总屏蔽层。这种电缆价格很贵,只用于成组地传送不同性质而且要求很高的信号,不仅能抑制外部干扰,还能抑制信号线间的串音。

上述几种屏蔽电缆适用于各种设备,但现阶段主要用于计算机设备中。

与无线电电子设备中使用的情况不同,工业电子控制设备中无论使用哪种屏蔽电缆都必须带有绝缘外套,而且施工过程中应避免损伤。应该指出,并不是线路中使用屏蔽电缆总是有得无失的。它的缺点在于加大了芯线间和芯线对地之间的电容,从而既增加输出装置的电容性负载,又影响高频输出信号的波形和幅值。因此,用屏蔽电缆作远距离信号传送时,要求脉冲信号有足够的宽度;在作数据采集时,要考虑脉冲波形的畸变;频率越高,屏蔽电缆对信号传输造成的附加衰减就越大。

尽管如此,大多数工业控制信号仍然需要使用小绞距的对绞屏蔽电缆。特别是 100kHz 以下的信号传输中,屏蔽电缆对电、磁、电磁干扰有较大衰减,可使用的极限频率能高达 10MHz,所以在低电平模拟信号、低抗干扰数字信号传送等要求较高的场合得到广泛应用。

#### (4) 扁平电缆和同轴电缆

扁平电缆主要供计算机等数字设备使用。由于同轴电缆的外屏蔽层作为信号返回导体,与单根芯线一起构成一对信号线时,容易引入低频传导性干扰;而双重屏蔽的同轴电缆和双晶轴电缆价格过于昂贵,所以在工业控制设备中,现阶段很少使用同轴电缆,只有少数情况用它作高频信号的传输线,如计算机与 CRT 终端间的信号传输线。

由于接口的干扰敏感度与其所属回路类型有密切关系,所以实际选用电缆时常按回路类型来决定。电力配电回路使用三芯或四芯电缆。装置内部配线使用双绞线,节距应小于 3cm。不同类别的信号、控制回路除采用单独屏蔽的对绞电缆外,为避免互相影响,不可集中在同一条电缆中。

在雷电多发地区,特别是户外的信号电缆应考虑防雷干扰,采用具有电磁和静电双重屏蔽的电缆。例如,以钢管、封闭的钢电缆槽等作为电磁屏蔽,以铜带或镀铜(铝)的塑料膜屏蔽层作为静电屏蔽,用抗电磁感应的对绞导线为芯线等。

### 7.2.4.2 电线敷设

以前厂房中电缆敷设几乎都是大电流者采用架空母线,小电流者采用电缆穿管方式。为适应现代化电气控制设备大量配线和抑制干扰的需要,现在大多采用电缆架配线方式。电缆架是承托电缆的专用金属架,分成几层,可以按层敷设不同类型回路的电缆,不仅容纳的配线数量很大,又可互相分开减少干扰。

电缆架有多种安装方式。中小规模的控制设备和车间内分散的电缆敷设在电缆沟中,靠两侧壁面,每隔 80cm 左右,按水平距离设置一组支架,这种方式虽然电缆容量较小,但结构简单。对于大规模成套设备,则采用电缆支架方式。在安装控制设备的电气间底下设置电缆层或地下室,里面沿控制设备和电缆路径架设电缆支架,这是用标准的电缆支架部件组装而成的连续式刚性金属结构。

电缆支架有多种形式,图 7-12 是用花孔板做的浅槽支架。花孔板是在其整个面上开有许多孔的薄板,既减轻自身重量,又改善散热,可以吊装,也可以立装,能组成很多层。由所架设的电缆量来决定电缆支架的宽度,既方便又灵活。根据散热需要,动力电缆在支架上只能单层敷设。而且只能占支架宽度的 50%~60%;信号和控制电缆可以重叠,但不超过两层。各层支架的间距一般为 30cm。电缆支架应该每隔一定距离,如 10~20m,与接地母线或接地的厂房结构作电气连接。

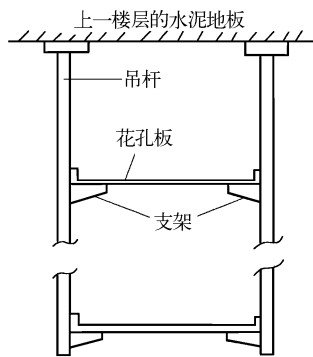


图 7-12 花孔板做的浅槽支架

不同类别回路的电缆分别敷设于不同的支架层上,通常多按下述层次从上到下排列:大功率动力电缆→低压动力、照明电缆→一般控制电缆→其他信号电缆→计算机电缆。但有时也根据现场施工和通风等具体情况,采用相反次序。

其中,计算机电缆的支架层采用封闭的金属电缆盒(槽),带分段的盒盖,与电缆架体有专用电气连接。如果室内敷设的计算机电缆与低压动力线路的距离在 1.5m 以上,与大功率动力线路的距离在 3m 以上,也可以使用不带盖的电缆架。电缆分层敷设的位置次序在任何部位,如拐弯、上升、下降、穿墙处等始终保持不变。

如果设备规模较小,电缆敷设空间有限,不允许设置过多层次时,也可把某些种回路的电缆合并在同一层中,如计算机电缆与其他信号电缆、一般控制信号电缆与低压动力或照明电缆可合用同一层支架,但是中间必须用隔板隔开。

通常,计算机机房内外都用电线沟敷设电缆,空间更小,可以把计算机电缆、信号电缆和一般控制信号电缆集中在同一个封闭的金属电缆槽中,但相互间必须用隔板隔开,如图 7-13 所示。低压动力和照明电缆应在钢管中敷设,而且与计算机电缆等要保持一定距离。隔板焊接在电缆槽上,隔板与盖板的间隙小于 2mm。

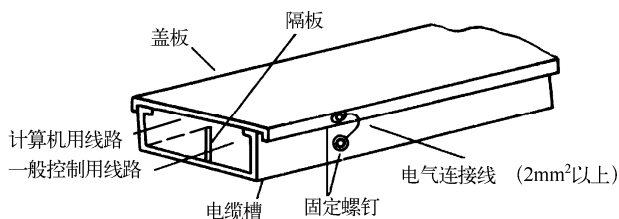


图 7-13 带有盖板的电缆槽结构

### 7.2.4.3 馈线干扰控制技术

馈线是指一切载流导线，包括信号线、控制线以及其他有电流流过的导线。在电子设备各单元电路之间、各部件（或分机）之间有各种不同性质或用途的连接导线，如电源线、信号线、控制线、地线等。此外，还有一些金属结构件，当有电流通过时，它们在电路上所起的作用也相当于导线。这些作用和性质各不相同的导线，情况较复杂，有高电位的和低电位的；有大电流的和 small 电流的；有高频的和低频的；有脉冲的、交流的和直流的。这些导线在电子设备内分布排列，如果处理不当，它们之间将相互干扰。

高电平线路往往是干扰源，它会对其他线路形成干扰；低电平线路是敏感线路，它往往受到其他线路的干扰。高频线路周围存在电磁场，大电流线路周围存在强磁场，在它们附近有导线通过时，由于耦合（或感应）而在导线上感生干扰电流（或信号）。当几个电路具有公共阻抗（负载）时，各线路之间由于电流的串入而形成干扰。此外，各电路接地后，由于地电流串流而形成干扰。

抑制线路干扰可采取各种方法，如隔离、滤波、屏蔽合理接地，以及妥善设计地线系统和电源馈线系统等。

#### 1. 隔离

隔离就是将相互干扰的馈线隔开一定距离，以切断或削弱它们之间的电磁耦合。隔离的原则和方法是：

（1）干扰线路和其他线路尽可能不要平行排列，如果必须平行，导线间距与导线直径之比应不小于 40。在可能情况下导线间距应尽量大一些，并且平行部分的长度越小越好。当机箱、机柜尺寸无法满足上述隔离要求时，干扰线路必须屏蔽。

（2）敏感线路与一般线路如果平行排列，其导线间距应大于 50mm。当敏感线路与一般线路必须平行排列而间距较小时，敏感线路应予屏蔽。

（3）电源馈线中的交流馈线和直流馈线必须隔离。当它们平行排列时，其导线间距应大于 50mm。电源馈线与信号线也应隔离，当平行排列时，其导线间距也应大于 50mm。

（4）高频导线对其他线路干扰最大，一般都要屏蔽。当高频导线长度小于波长的  $1/4$  时，可以不屏蔽但必须与其他线路隔离。

（5）有些脉冲线路其脉冲功率较大，对其他线路构成严重干扰，应按干扰线路对待；至于电平较低的脉冲线路（如数字电路），可按一般线路处理；当电平很低时，应按敏感线路对待，也可根据具体情况处理。

（6）各种导线如十字交叉排列，可切断或削弱它们之间的电磁耦合，其效果与隔离相同。因此在布局导线（走线）时，不同类型的导线尽量不平行排列，而多采用十字交叉排列。

#### 2. 滤波

让某些频率的电流通过，而不让另一些频率的电流通过的无源四端网络统称滤波电路或滤波器。利用滤波电路的通频带特性可以滤除干扰信号。根据滤波电路所通过的频率不同，可分为低通、高通、带通和带阻滤波电路（器）。

由于干扰信号的频率相对于有用信号要高一些，所以滤除干扰信号的波滤电路（器），多为低通滤波电路。电源馈线、进出设备的控制线以及进出屏蔽盒的某些信号线等，都应加低通滤波电路（器），以免这些导线对外界形成干扰，或免受其他电路导线的干扰。低通滤波电路在放大器中用以防止放大器级与级之间通过电源阻抗或通过反馈电线而形成的寄生耦合，通常称为去耦

电路。

必须指出,当滤除频率较高的干扰信号时,由于存在电容器的引线电感而使并联阻抗增大,严重时可能使滤波电路失去作用。因此滤除高频干扰时,应采用引线电感小的电容器,并且电容器的接线应尽可能短。

如欲滤除频率范围很大的干扰信号,例如在直流馈电线中滤除一切交流成分,可将几种不同的电容器并联起来使用。有些电子设备的滤波电路用三个电容器并联使用,它们分别是电解电容器、纸质电容器和云母电容器,并分别滤除工频、音频和射频干扰,不能彼此代替。

滤波电路中的串联阻抗可用电阻器,也可用电感线圈。RC滤波电路较简单,应用普遍,但由于电阻压降较大,欲滤除的干扰频率的电压虽然被衰减了,但需要传输的信号电压(或电源电压)也被降低了。因此,RC滤波电路只用于电流小而电压高的传输信号电路;在大电流的电源传输线,为避免压降损失,应采用LC滤波电路,但LC滤波电路在电源刚接通的瞬间有起伏效应。

滤波电路的滤波性能取决于串联阻抗与并联阻抗的比值(衰减系数)。由于小电流的电感线圈和低电压的电容器容易制造且价格便宜,因此,对于低电压大电流的传输线路,滤波电路应采用小容量电感和允许的最大容量的电容;而对于高电压小电流的传输线路,滤波电路应采用小容量电容和允许的最大容量的电感。

如果干扰电平不高,且屏蔽要求较低,可采用穿心电容器,而不必用复杂的滤波电路。穿心电容可将干扰信号短接到“地”,其接地线很短、便于安装。它可用螺母紧固或直接焊在屏蔽盒的金属板上。

如果干扰电平高或屏蔽要求高,则应采用复杂的滤波电路。滤波器的结构和安装很重要,应注意以下几点:

- (1) 滤波器本身要屏蔽。
- (2) 滤波器的输入线和输出线,在高频时应屏蔽,并且要相互远离。
- (3) 滤波电路的接地线要短,以就近接地为好,接地应可靠并且接触电阻要小。其他连接线也以短为好,电容器的非接地端的连接最好接成V形,以减小引线电感的影响。

### 3. 导线屏蔽

电子设备中的导线有时需要屏蔽,以避免导线辐射电磁场对外界干扰;同时也能防止外界干扰信号通过导线进入电路。

#### (1) 导线的屏蔽结构及其应用场合

导线的屏蔽是在导线外面套上一层金属丝编织软管。当中的导体称为芯线(内导体),套在外面的金属编织软管称为隔离皮(屏蔽层);为防止芯线与隔离皮短路,它们之间衬有绝缘材料。这种带有隔离皮的导线,较细者称为屏蔽线,较粗者称为隔离电缆。隔离电缆可分为单芯的和多芯的,它的隔离皮外面往往包一层绝缘套管,起保护和绝缘作用。屏蔽线和隔离电缆均已标准化,产品已成系列,可根据要求选用。

一般情况下,低频、直流导线不用屏蔽线而用一般导线,为了防干扰可采用滤波或去耦电路滤去除频率较高的干扰信号。大电流馈线周围存在磁场,为防止干扰一般可采用隔离电缆,并与其他导线隔开单独布线。

#### (2) 使用屏蔽线的注意事项

① 屏蔽线分布电容大,相应的损耗也大,而且经分布电容到机架(底座)的容性电流容易造成寄生耦合。因此能用裸导线的地方就不要用屏蔽线,这时可将导线和电路、元器件一起屏蔽。

② 当屏蔽线的长度大于沿导线传输信号的最短波长的  $1/4$  时,屏蔽线上就会出现驻波,并成为一个辐射天线。因此,高频屏蔽线的长度不宜过长,否则就要考虑阻抗匹配。

③ 高频屏蔽线的隔离皮应就近接地,如必须采用接地引线,也应尽量短,线径宜大些。

#### 7.2.4.4 地线干扰控制技术

“地”就是与各电路相连接并确定为零电位的导体,它可以是较粗的铜线、钢带,铝线与铝带,也可以是设备的底座、外壳、机箱(插箱)、机架等。理想的“地”应该是一个优良导体,即电流流过时不产生电位降,各点的电位相同。在测量电路上各点电位(压)时,以“地”的电位作为参考点,即认为“地”相对为零电位。电路上某点的电位比“地”高时称正电位(压);电路上某点的电位比“地”低时称负电位(压)。因此不能认为“地”就是设备中的最低电位。

实际上不存在绝对的导体,一切导体均有电阻(阻抗),因此设备中的“地”上各点电位也不相同。所以在设计、测量电路时,认为“地”是等电位的;而在分析地线给电路带来的干扰时,则又必须把“地”看作不是等电位的。

对于小型的、移动式的电子设备,电路的地线与底座(机架)相连,并不一定要与大地连接。对于大型固定式的电子设备,电路的地线都要和大地良好连接。

电源供出的电流既有直流分量也有不同频率的交流分量,因而在地线中由地阻抗产生的电压降,除有直流压降外,还有各种不同频率的交流电压降。这些交流电压降加给各个电路单元,就形成了干扰。地电流流经地阻抗所形成的干扰称为地阻抗干扰。此外,地环路干扰也是地线中存在的一种干扰形式。

##### 1. 用低阻抗馈线减小地线干扰

减小地线中的电阻、电感和环路面积可以减少地线干扰。

##### 2. 阻隔地环流减小地线干扰

(1) 采用变压器阻隔地环流 变压器不能传输直流信号和频率较低的信号,但变压器对地线中较低频率的干扰具有很好的抑制能力。此外,电路单元之间传输的信号电流只在变压器绕组连线中流过,不流经地线,因此可避免对其他电路的干扰。

(2) 采用扼流圈阻隔地环流 当传输的信号有直流分量或有很多不同频率的交流分量时,就不能用变压器,而应采用扼流圈以阻隔地环流。扼流圈的两个绕组的绕向匝数都相同,信号电流在两个绕组中流过时产生的磁场恰好抵消,所以扼流圈对信号电流并未起扼流作用,可较顺利地传输信号。地线中的干扰电流(也称纵向电流)流经两个绕组时产生的磁场同向相加,故扼流圈对干扰地电流呈现出较大的感抗,因而起到了阻隔地环流的作用。

(3) 采用同轴线阻隔地环流 在电路单元间用同轴线传输信号,可以阻隔地环流。由于电流存在集肤效应,使信号电流沿内导体的外表面和外导体的内表面流过;而干扰地电流沿地线表面和外导体的外表面流过。因此,同轴线内信号的电磁场不会向外泄漏,而干扰电磁场也不会串入同轴线内。所以用同轴线传输信号,既可防止信号电流干扰其他电路,同时也抑制了地环流和电场的干扰。

##### 3. 合理接地减小地线干扰

根据不同情况可采用一点接地或多点就近接地。

一点接地就是将电路中各接地元件集中于一点接地。一点接地不仅能限制本级的电流只在本级范围内流通,而且还能大大减小流过底座的电流。由于一点接地时,底座(机架)中的地电流几乎为零,因此就抑制了地电流影响,从而消除或减小了地线干扰。

在频率较高（如 10MHz 以上）时，元件与导线对地的分布电容的影响增大，高频电流通过分布电容就流入底座（机架），即高频电流流入“地”与接地点无关。此外，一点接地时往往使接地引线过长，长的接地引线有较大的引线电感，容易产生寄生耦合。所以在频率较高时要采用多点就近接地，使接地元件就近以最短的引线接地，这样接地引线短，引线电感和分布电容较小，减小了寄生耦合。但是多点就近接地对抑制地电流干扰较差，可采取其他方法抑制，如在电路单元间采用屏蔽线；把电路单元放在屏蔽盒内并与底座（机架）隔离，此时屏蔽盒与底座（机架）一点接地等。

## 7.2.5 电路干扰控制技术

### 7.2.5.1 模拟电路干扰控制

在一般工业测量仪器和控制设备中，目前仍广泛地应用模拟电路。因此，减少模拟电路的误动作，提高模拟电路的抗干扰能力也是电子设备防干扰技术的一个重要方面。

#### 1. 模拟电路噪声控制的一般措施

现在很多电子装置和设备都是模拟电路与数字电路相混合的系统。在这样的系统中，数字电路有时会成为微弱模拟量信号电路的噪声源；为确定防噪声措施，应该首先查明噪声源。

（1）对于装置内部的噪声源，应从两方面考虑：一种是噪声出自元器件本身，为解决这类噪声，器件生产厂家应该在器件设计和生产制造过程中给予充分考虑，而使用单位应该注意元器件老化筛选和挑选热反馈影响小的芯片等；另一种产生噪声的原因是由于电子电路的技术设计或装置的产品设计不合理；为解决这类噪声问题，要求设计人员注意下列几项建议。

- ① 器件布置不可过密。
- ② 改善装置的散热条件。
- ③ 分散设置稳压电源。
- ④ 在配线和安装位置方面要尽量减少不必要的电磁耦合。
- ⑤ 尽量减小公共阻抗的阻值。
- ⑥ 实行一点接地。

（2）对于装置外部的噪声源，应该根据噪声性质采取有效措施。可从下列几方面入手。

- ① 对于中、高压电路附近易产生静电感应噪声，可采取的措施主要有下面几项。
  - 对电子装置和引线加接地的金属屏蔽。
  - 远距离传送信息的输入、输出线应有良好的接地屏蔽，尤其应保证柜体电位与传输电缆接地电位一致。
  - 尽可能缩短信号线的长度。
  - 减小电路的阻抗。
  - 对整个系统实行全屏蔽。
- ② 靠近强磁场时易受电磁干扰，它对集成电路器件的影响尤为严重，应采取下列措施：
  - 信号线要尽量远离产生电磁感应的电力线。
  - 如果受空间条件限制，信号线与电力线不能远离时，应该采取使两者的走线互相垂直的布线方式。
  - 施加电磁屏蔽。
- ③ 对于高频装置、火花放电等产生的电磁波噪声、汽车点火栓噪声、大功率调频或调幅电

磁波、雷达波以及晶体管内部产生的高频噪声等，应以隔断噪声传递路径为主要着眼点，施加相应的屏蔽；换掉产生较大噪声的元器件也是抑制噪声的一种措施。

④ 对于电网浪涌电压等噪声可以采用多种抑制方式，最普遍的是在线路上设置浪涌吸收器、线路滤波器、信号输入滤波器和其他多种保护器件。

获得一稳定且线性的电路后，其所有连线可能还需滤波，同一产品中的数字电路部分总会把噪声感应到内部连线上，外部连线则承受外界的电磁环境的干扰。不要采用有源电路来滤波和抑制射频带宽以达到防干扰要求，只能使用无源滤波器（最好是 RC 型）。在运放电路中，只有在其开环增益远大于闭环增益时的频率范围内，积分反馈法才有效；但在更高频率，它不能控制频率响应。

应避免采用输入、输出阻抗高的电路，比较器必须具有迟滞特性（正反馈），以防止因为噪声和干扰而使输出产生误动作；其迟滞特性还能防止靠近切换点处的振荡。不要使用比实际需要快得多的输出转换比较器，保持  $dv/dt$  在较低状态。

有些模拟集成电路内的电路对高场强极为敏感，这时可用小金属壳将其屏蔽起来（如果散热允许），并将屏蔽盒焊接到 PCB 地线面上。

与数字电路相同，模拟器件也需要为电源提供高质量的射频旁路（去耦），但同时也需低频电源旁路，因为模拟器件的电源噪声抑制率（PSRR）对 1kHz 以上频率是很微弱的，对每个运放、比较器或数据转换器的每个模拟电源引脚的 RC 或 LC 滤波都是必要的，这些电源滤波器转折频率和过渡带斜率应补偿器件 PSRR 的转折频率和斜率，以在所关心的频带内获得期望的 PSRR。

（3）由于实际的电子装置或设备都有各自的特点，它们在电路、结构、运行条件和使用环境等很多方面是不同的，必须结合实际情况进行具体分析，才能决定应该采取哪一种或几种行之有效的噪声抑制措施。但就总原则来说，应该注意下面 3 点：

① 数字电路与模拟电路要分开接地，应采用放射形、平面形等接地方式，尽量避免使用单根接地线。

② 对微弱模拟量电路实行全面覆盖的电磁屏蔽。

③ 采用直流隔离措施。

## 2. 集成运放电路的噪声控制

### （1）集成运放电路的内部噪声及抑制

集成运放电路的输入级一般由双极型晶体管构成，它的内部噪声成分和一般小信号晶体管产生的相同。主要的噪声类型有闪烁噪声、散粒噪声、热噪声和爆裂噪声等。这些噪声大多数是由运放电路的第一级使用的晶体管或场效应晶体管的特性所决定的。

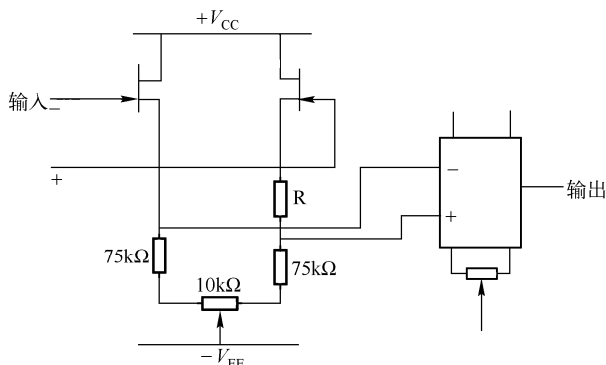


图 7-14 用场效应晶体管作输入级的电路

当一般的双极型运算放大器在要求信号源电阻较小，而实际信号源电阻较大的场合工作时，可用低噪声的场效应晶体管作为输入级。电路如图 7-14 所示。

### （2）集成运放电路的外部噪声及抑制

① 静电耦合对运放电路的影响及其抑制。噪声通过静电耦合对运算放大器电路产生的影响，除与分布电容有关外，还与噪声频率和电路的输入阻抗有关，在噪声环境恶劣的场合，要采取静电屏蔽的方法来抑制噪声。



② 电磁耦合对运放电路的影响及其抑制。运放电路受电磁耦合噪声影响的原因是靠近电源变压器而受泄漏磁场的影响,以及附近回路流过大电流受其散发的磁通影响,可采取的措施是减少电路布线在印制电路板上形成的环路面积或在运放电路的输入端加接低通滤波器。

③ 公共阻抗耦合对运放电路的影响及其抑制。信号电流和噪声电流流过公共阻抗时,噪声通过公共电阻耦合到信号上(如通过地线的公共阻抗的耦合噪声),当大信号电流流过时,在阻抗较大的地线上产生的噪声电压,对于处理小信号的运放电路是一个很大的噪声源。可采取的措施包括尽可能减少公共阻抗、尽量缩短导线长度、加粗印制导线宽度、使用低阻抗铜板作地线、采用大平面接地等。

### (3) 运算放大器振荡的抑制

运算放大器在使用中可能出现输出振荡现象,这是因为实际电路中存在分布电容,使一部分输出信号正反馈到放大器输入端的缘故,或者是因为外围电路侵入了噪声。一般来说,振荡很少是由于设计参数选择不当造成的,理论上可以对电路作稳定性计算,做出稳定性判断,但结果和实际往往相差较远,所以要在实际电路组装后进行调整。

对于已发生振荡的电路,将该电路的输出接到示波器上用手指触摸电路各个部分,引起振荡频率改变或者振荡停止的部位便是产生振荡的最敏感处,也就是产生振荡的主要部位。然后对该部位进行分析处理和改进。但是,判断未发生过振荡的电路是否会在外界噪声影响下产生振荡则比较困难,通常可从下述几个方面着手:

① 把阶跃量加到输入端,观察输出端的波形,可根据波形形状来判断该电路是否易发生振荡,图 7-15 (a)、(b) 是稳定波形,图 7-15 (c)、(d) 是易发生振荡的电路波形。

② 在运算放大器输出端接容性负载,测出其允许的最大容性负载值。在实际线路中应使负载的电容值小于此允许值,并留有裕量。

③ 选择元件时,尤其是电容器和晶体管,要注意它们的温度特性。

④ 电源波动也能引起振荡,应从电源方面考虑相应措施。

### (4) 集成运放电路共模噪声控制

共模噪声电压主要是由于信号源与接收回路之间产生的接地电位差所造成的,回路的间距越大,共模噪声电压也就越大,要全部消除这种共模噪声的影响是困难的,但在某个频带范围内可有效地抑制。

① 使用运算放大器抑制共模噪声。使用运算放大器抑制低频的共模噪声电压是非常有效的,由于运算放大器可作为差分放大器使用,故即使用一级运算放大器,电路也能具有一定的抗共模噪声能力。

② 输入线屏蔽抑制共模噪声。当信号源离电路较远时,容易在传输线上感应噪声,可采取用双绞线传送电路中的信号且屏蔽层连接信号源的接地端。

③ 高频共模噪声的抑制。对频率较低的共模噪声,运放电路有较好的抑制效果,而对较高的频率,运算放大器的共模抑制比就很差。抑制高频共模噪声的方法很多,如变压器法等。

④ 低频共模噪声的抑制。在运放电路中常见的是低频共模噪声,尤其是市电频率的共模噪声,抑制这种共模噪声可采取的方法如下:

a. 采用接地隔离方式的信号变压器。

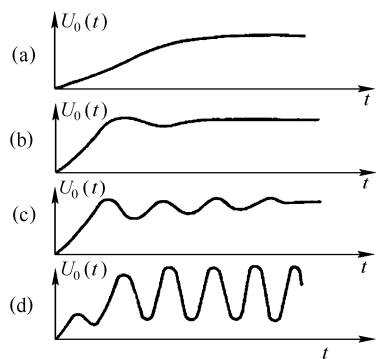


图 7-15 阶跃输入时的输出波形

- b. 将电路几个部件或几块印制电路板。
- c. 将每个部件的接地分开, 且隔离电路。
- d. 采用闭合磁回路的铁芯, 如环形、EI 形或筒形, 其中环形最好。
- e. 采用双线无感绕制法, 使泄漏电感尽可能小。

### 3. 微小电压放大电路干扰控制

由于微小电压信号很微弱, 所以对信号的传输、接收和放大的防干扰问题提出很高的要求, 目前通常利用运算放大器来放大微小电压, 如典型的热电偶放大电路。代表性的噪声源有传输线路中由于电化效应而产生的电池效应、电力线的电容性耦合所产生的电动势及大地中晶体整流效应所产生的电压等, 这些噪声电压对电路是以共模噪声形态起作用的。

#### (1) 影响微小电压放大电路的因素

微小信号测量中的传感器和放大器, 由于信号微弱, 易受电磁波的干扰。如靠近机场、无线电发射机附近, 微小电压测量系统的测量值都会受到较大的干扰, 由于运算放大器内部半导体检波作用, 使高频信号以频率不太高的噪声电压或以直流电平的漂移形式在输出端出现。

另外, 还要重视电源中高频噪声对微小电压放大电路的影响。

#### (2) 微小电压放大电路的防干扰措施

① 小信号电缆的布线要远离各种强干扰源, 不要与其他大信号电缆一起扎结或相平行。尽可能缩短或加宽形成公共阻抗的导线。信号地和电路地要有同一地电位。

② 平衡式差分放大电路对微小信号的接收和放大较适用, 同时在差分放大器或差分比较器上使用双绞线或双芯同轴电缆有很好的防干扰效果。

③ 使用隔离放大器将输入和输出隔离, 即使有很高的共模电压, 也会有很好的抗干扰性能。隔离变压器虽然有很多优点, 但不能传送直流成分, 当含直流成分的信号传送时要用信号调制电路。也可采取用光耦合器来代替变压器的方法, 效果较好。

④ 微小电压放大电路抑制高频噪声干扰的措施如图 7-16 所示。图中对测量系统采取了严格的电磁屏蔽措施, 同时采用在运算放大器各端接入小电容滤波的方法抑制干扰。这样, 不仅能有效抑制电磁波的输入耦合, 还可有效抑制继电器的火花干扰、晶闸管产生的干扰及 DC/DC 转换器发出的各种干扰。但所用的电容器的高频特性要好, 而且要尽可能缩短电容器的引线。

⑤ 在运算放大器的输入端串接入铁氧体磁珠, 如图 7-17 所示, 使放大器免受高频辐射影响具有很好的效果。

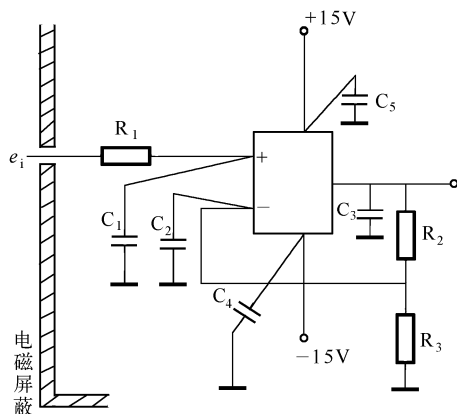


图 7-16 微小电压放大电路抗电磁波干扰的措施

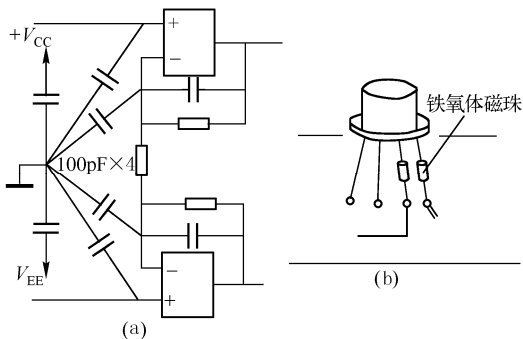


图 7-17 放大器输入端串接磁珠抗高频辐射干扰的方法

#### 4. 集成运放电路抗干扰装配工艺

##### (1) 使高输入阻抗电路有稳定的高绝缘输入

① 提高印制电路板的绝缘性能。高输入阻抗的运放电路应选用高绝缘性能的印制基板，但绝缘性能好的基板价格较高，应考虑性能价格比做出选择。另外，更要注意的是印制电路板表面污染会使绝缘性能下降，解决的措施如下：

- a. 用溶剂清洗装配焊完的印制电路板。
- b. 洗净烘干后，涂上有高绝缘性能的清漆或硅脂等。
- c. 调试工作中注意戴手套。

② 采取输入端隔离的方法。此法是将高输入阻抗部分用铜箔线围起来，并与电路的等电位的低阻抗部分相接。由于隔离线和高输入阻抗部分的电位相等或相近，泄漏电流几乎为零，从而降低了对印制电路板绝缘阻抗的要求。电压跟随器电路的隔离方法如图 7-18 所示。

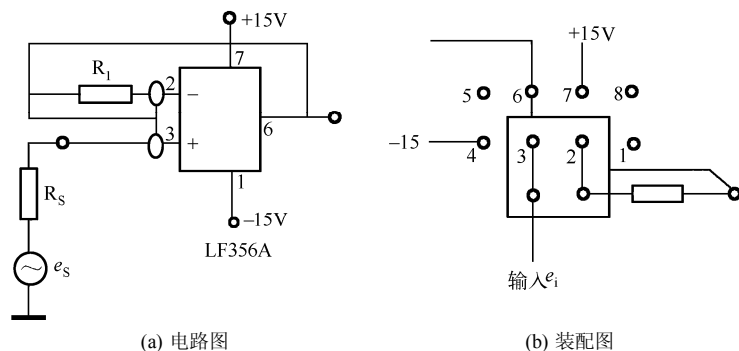


图 7-18 电压跟随器的隔离措施

③ 使用聚四氟乙烯绝缘底座。采用绝缘性能极好的聚四氟乙烯制成的接线底座，安装在印制电路板上，高输入阻抗部分均在此接线柱上相连，这样即可保证线路的高绝缘性能，又有一定的抗振性能，装配亦方便。

##### (2) 高增益放大器的装配措施

运放电路基本上由高增益放大电路组成，在输入端加入的影响容易在输出端出现，特别是由于输入处的线路装配不当使输入端耦合入噪声会引起电路的振荡等问题。在电路装配时，要十分注意输入端的装配。不要在反相输入端接过长的连接线和不必要的器件，尽量不要接较大体积的器件等，以免在输入端输入耦合噪声。

##### (3) 运放电路中使用电位器应注意的问题

电位器在电路中的使用，最大的问题是可靠性和噪声。电位器的中心调节触点的接触不良会产生较大的接触噪声，而且电位器受机械振动、温度、湿度的影响也很大。为此可采取以下措施：

- ① 电路中尽量不用或少用电位器。
- ② 将电位器与固定电阻串联或并联。
- ③ 要求较高的场合，最好不采用金属膜及碳膜型电位器，采用线绕型或金属陶瓷型的电位器，并尽量采用尺寸大的电位器。
- ④ 印制线尽量粗和远离发热元器件。
- ⑤ 焊接接触电位器端子的时间要尽量短。

##### (4) 装配上要注意的其他问题

- ① 对宽频带运放电路，印制电路板的设计、零部件的使用及装配工艺要像对待高频电路那

样处理。

② 注意克服地线公共阻抗的耦合。装配设计时将大信号地与小信号地分开, 以及采用一点接地的方法。

③ 注意热平衡问题, 尽量使输入电阻值成对地基本相等, 或采用其他方式保持温度平衡。

④ 改善触点的接触性能, 保持触点良好的电气接触, 不使它成为干扰。

### 7.2.5.2 数字电路的干扰控制

目前, 数字电路大量采用数字集成电路, 由于数字集成电路具有较高的噪声容限, 其抗干扰性能较好, 但数字电路与其他电路一样, 易受到外部和数字电路内部干扰, 如果使用时装配不当, 仍会使数字电路因受干扰而不能正常工作, 必须采取相应的干扰措施。下面几种措施是普遍适用的。

(1) 在设计阶段就注意输入/输出线路的隔离, 不可任凭输入端子悬空, 必须结合电路的实际情况和条件妥善处理。例如, 通过电阻上接电源, 或者端子合并使用。

(2) 仔细研究和处理各部分的接地, 包括电缆的屏蔽层接地。

(3) 装设线路滤波器、隔离变压器和自动电压调节器等。

(4) 尽量缩短电源线、接地线, 避免产生公共阻抗噪声。

(5) 旁路电容器必须接在最靠近集成电路的电源插脚之间。

(6) RS 触发器等的输入端和地线间应该接入陶瓷电容器, 以增强该器件的抗干扰能力。应该在上述几种措施的基础上, 针对具体条件, 找到克服各种干扰的最佳办法。

#### 1. 外来干扰的控制

常见的外来干扰有工业火花放电、电力变压器和电动机及一些电气控制设备触点产生的干扰。抑制方法如下:

(1) 使电路的逻辑部件远离大功率器件, 并把数字电路加金属外壳屏蔽并接地。

(2) 对电源线引入的干扰采用去耦措施。即用 RC 或 LC 滤波环节消除或抑制直流电源回路因负载变化而引起的干扰。这种方法在 TTL 数字电路中经常采用, 具体办法是在印制电路板的电源线输入端与地之间并接一个容量为  $5\sim 50\mu\text{F}$  的电容, 以减小瞬变过程电流的影响。为有效地抑制电源中的高频分量, 可再并接一个电容, 有时还串接一个电阻, 组成 RC 去耦环节, 还可在紧靠逻辑器件的电源线上并接去耦电容, 如图 7-19 所示。

(3) 选用大电容小电感的电源线。在工程实际中, 常用矩形截面汇流条来代替圆截面汇流条, 安装电源母线尽量与地线或地线平面平行敷设, 布线距离要尽量缩短, 使电源线具有低的动态电阻。

(4) 对开关、接点信号采用滤波电容或加施密特触发器作输入缓冲来抑制。

(5) 用无抖动开关消除触点噪声影响。当继电器或开关的机械触点与集成电路输入端相连时, 为防止机械触点抖动而影响数字电路正常工作, 常用图 7-20 所示无抖动开关来抑制干扰。该电路可用作实验中的单脉冲发生器, 图 7-20 中两个与非门组成简单 RS 触发器。

#### 2. 直流电源干扰的控制

直流电源干扰通常为直流电源滤波不佳、电压不稳定, 进而往往导致逻辑电路误动作。为防止产生干扰常采用以下措施:

(1) 电源变压器初级绕组与次级绕组间采用屏蔽层, 并可靠接地(屏蔽层切不可短接形成回路, 以免烧毁变压器线圈)。在电源变压器前加接电源滤波器, 以滤去高次谐波干扰。

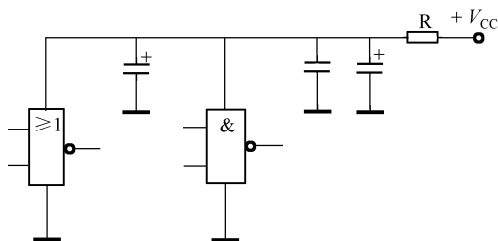


图 7-19 用去耦电容抑制干扰

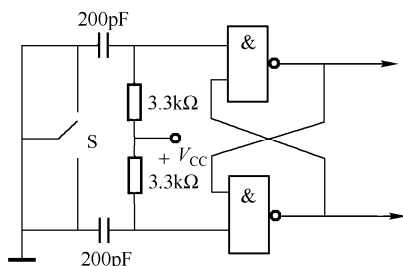


图 7-20 无抖动开关

(2) 采用高稳定度、低输出阻抗的直流电源，以减小电源开启切断时瞬时过电流冲击，并缩短瞬时过电流冲击时间。

(3) 尽量采用粗而短和动态电阻小的电源线。

### 3. 瞬态电流干扰的控制

瞬态电流干扰是由电路的过渡过程引起的，如 TTL 集成电路在状态转换时的尖峰电流、负载电容充放电时的瞬变电流等。抑制方法如下：

(1) 采用电源去耦措施，即在电源线和地之间并接  $50\mu\text{F}$  电容，且以电源线上干扰尖峰不能使逻辑器件的输出状态发生变化为原则。

(2) 布线时，连线尽量短，减少不必要的杂散电容。地线尽量粗而短。

(3) 有大电容负载时，串接限流保护电阻，避免关断电源或电源电压下跌时，电容上电压高于电源电压的情况出现。

### 4. 串音及其抑制

所谓串音，是指信号传输线在传输信号的过程中在其相邻信号线上产生的噪声，大多发生在多芯电缆、束捆导线或印制电路板上平行的印制导线之间。串音的强弱与相邻两信号线间的互阻抗和信号线本身的阻抗有关。串音大小与信号频率、传输线阻抗及信号线的形式有关。频率越高，阻抗越高串音干扰越大。双绞线对串音抑制能力较强。

#### (1) 扁平电缆的串音抑制

扁平电缆有很多优点，然而使用不当，很易发生串音，引出意想不到的问题，影响数字设备的正常工作。扁平电缆导线间的分布电容与其长度成正比，所以布线较长时尤应注意串音问题。为克服串音影响，首先应尽量选用噪声容限大的元件和电路，然后再结合具体情况采取下列几种措施：

① 用一条扁平电缆传输多种电平信号时，必须按电平级别分组，由于高频成分都发生在脉冲前沿和后沿时间，分组时，应尽量把前后沿时间相近的同级电平信号划为一组。

② 用一根接地导线把两个相邻信号组的导线隔开。

③ 在装配中，力求使扁平电缆贴近接地底板，必要时，可专门给扁平电缆加设接地屏蔽底板，使导线之间的部分分布电容转化为对地电容。

④ 如果串音严重，可考虑采用双绞线结构的扁平电缆，并把其中一线接地，这种扁平电缆对抑制静电耦合和电磁耦合也有效果。

#### (2) 普通传输线的串音抑制

信号传输线除采用上述扁平电缆外，通常多用单线、双绞线和同轴电缆。为预防串音，应从以下几方面进行考虑。

① 尽量减小连线长度。

- ② 敷设机柜中的信号线时,应尽量使其靠近接地底板,以增大对地电容而减少串音。
- ③ 设计印制电路板上的信号线时,应力求靠近地线,或者用地线包围它。
- ④ 信号传输线与其他线之间尽量加大距离,尽可能避免平行走线,采用分散、交叉形式走线。在必须走长线且平行的情况下,尽可能靠近地线走线,且尽量减小平行段的长度。
- ⑤ 用两点接地的双绞线作传输线,既可显著降低串音噪声,又能起到静电屏蔽作用,而且不受地形的限制,现场敷设比较方便。
- ⑥ 在信号输入处加接施密特触发器,利用它所具有的可变阈值特性来消除串音信号,使其不被逐级放大。

### 5. 反射及其抑制

数字电路中的传输线产生反射信号的原因是输出器件、传输线与接收器件间阻抗不匹配。另外,长的输入线分布电容、电感较大,容易产生 LC 振荡,致使产生信号延迟、振荡、波形不良等现象,甚至使门电路动作延迟或出错。在短距离的数据传输中,反射造成的波形畸变不严重,影响不大,而某些高速逻辑电路因传输线传输时间与所传信号的延迟时间大致相同,反射会带来严重后果,有的使传送的信息产生错误,有的使电压超过电路的极限值,影响电路的正常工作。当门电路的信号传输线大于 1m,上升和下降时间小于 1ns 时,必须考虑信号的反射。经常采用以下几种抑制措施。

- (1) 尽量缩短接线长度,互连的单线在没有专用接地回路时,长度不许超过 25cm。互连的单线长度在 25~50cm 时,走线必须靠近接地板。
- (2) 长传输线采用阻抗匹配措施,如在输入端串接一个电阻。
- (3) 在驱动门的输出端不要再另接门电路,以免因反射而产生信号畸变致逻辑电路出错。
- (4) 发送端如果采用集电极开路型集成电路器件,而接收端采用施密特集成电路器件时,其抵抗噪声的能力会更强一些。
- (5) 同轴电缆和双绞线的特性阻抗以 100 $\Omega$ 左右为宜,过低会使驱动困难,过高会增加串音噪声。
- (6) 传输线的地线必须确实连接着发送端和接收端,并要靠近驱动器件和接收器件的良好接地点。

### 6. A/D 转换器的干扰控制

前面介绍的是数字电路通用的抗干扰方法,A/D 转换器抗干扰有其特殊性。A/D 转换器是将模拟量转换为多位数字量的转换器,它对模拟量的微小噪声影响十分敏感;对 A/D 转换器中的关键元件要求十分严格,如积分电容器;对时钟频率的要求也很严格,稍有疏忽,就会引起很大误差。

#### (1) 积分电容屏蔽接地

为抑制噪声影响,通常是削弱噪声源或降低元件接收噪声的能力,即尽量降低元件的阻抗或对元件作屏蔽处理。而模-数转换器的积分器因受时间常数限制,阻抗不可能很低。用金属壳聚丙烯电容器做积分电容器能使误差尽量减少,但是因噪声侵入而使误差增大的问题仍然很难避免。所以经常如图 7-21 所示,把积分电容器用铜箔包起来后单独接地。

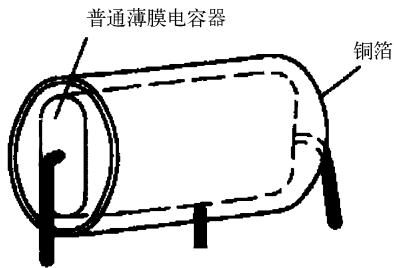


图 7-21 电容器包以铜箔并接地

单独接地。

#### (2) 旁路电容与去耦电容的设计

设计印制板时经常要在电路上加电容器来满足数字电路工作时要求的电源平稳和洁净度。电路中的电容可分为去耦电容、旁路电容和容纳电容三类。去耦电容用来滤除高速器件在电源板上引起的干扰电流,为器件提供一个局域化的直流,还能减低印制电路中的电流冲击的峰值。旁路电容能消除印制板上的高频辐射噪声。噪声能限制电路的带宽,产生共模干扰。容纳电容则配合去耦电容抑制噪声。

设计中最重要的是确定电容量和接入电容的地点。电容器的自谐振频率是决定电容设计的关键参数。电容器有引出线,就会给电容附加了固有的电感和电阻,考虑这些因素,实际电容器可看成由电阻、电感、电容组成的串联谐振电路。因此,实际电容器都有自谐振频率,在自谐振频率以下,电容器呈电容性;高于自谐振频率时,电容器呈电感性,阻抗随频率增高而增大,使旁路或去耦作用大大下降。应该选择自谐振频率高的电容器。

在集成电路中,电源并接旁路电容器是抗干扰的常规措施。通常每片集成电路应接一个旁路电容器以降低电源的高频阻抗,这样能有效地克服芯片的内部噪声和电源噪声。加接旁路电容,对A/D转换器尤为重要,否则会出现数据输出异常的情况。

电源板和接地板之间构成的平板电容器也有自谐振频率,这一谐振频率如果与时钟频率谐振,就会使整个印制板成为一个电磁辐射器。这一谐振频率可以达到200~400MHz。采用一个大容量的电容器与一个小容量的电容器并联的方法可以有效地改善自谐振频率特性。当大容量的电容器达到谐振点时,大电容的阻抗开始随频率增加而变大;小容量的电容器尚未达到谐振点,仍然随频率增加而变小并将对旁路或去耦起主导作用。例如,去耦电容为大容量电容器,则容纳电容作为小容量电容器。

在电源引线比较长时,瞬变电流引起较大的压降,此时就要加容纳电容以便维持器件要求的电压值。电容材料对温度很敏感,要选温度系数好的。还要选择等效串联电感和等效串联电阻小的电容器,一般要求等效串联电感小于10nH,等效串联电阻小于0.5Ω。在每个路LSI或VLSI器件处都要加去耦电容,电源入口处要加入旁路电容。此外,I/O连接器、距电源输入连接器远的地方、元件密集处、时钟发生电路附近都要加旁路电容器。

### (3) 避免噪声侵入输入电路

尤其是高输入阻抗的模-数转换器,应在输入端设置钳位二极管,防止输入过电压,并采用放大器缓冲,削弱共模和差模噪声后再作模-数转换。

### (4) 数字地和模拟地分开

对于差动型模-数转换,设计印制电路板的导线时,模拟地和数字地要分开,以免互相影响。否则逻辑电路工作时,地线上的电平变化将对模拟量电路的工作产生很强的干扰,数字噪声重叠在模拟量输入电压中,使模-数转换器不能正常工作。

上述4项也适用于数-模转换器,所不同的是需在数-模转换器输出端设置缓冲放大器,接入滤波器,以免由于计数器输出所产生的脉冲噪声影响模拟量的输出。此外,还需要考虑电源容量是否足够。

## 7. 多路转换器的噪声抑制方法

多路转换器易受共模噪声的干扰,目前工业上常用的有隔离式多路转换器和集成电路式多路转换器,由于集成电路开关耐压低,因此在共模噪声隔离的场合不宜使用集成电路式多路转换器。采用隔离式多路转换器,由于各点输入信号均被变压器隔离,不会因噪声产生过电压而损坏放大及转换电路。

抑制噪声干扰的基本原则是不产生、不传递和不响应噪声。对多路转换器可采取以下措施:

(1) 在多路转换器输入端接入共模扼流圈, 对抑制外部传感器引入的高频共模噪声十分有效。

(2) 多路转换器的隔离变压器采用双重屏蔽接法, 切断变压器分布电容传送高频噪声和脉冲噪声的通道。

(3) 在计算机与 A/D 转换器之间采用光电耦合的隔离方法, 使高频噪声不能侵入对方。

(4) 用电容器将前置放大器的频带变窄、降低其对高频噪声的响应能力、降低变压器的带宽及增加采样脉冲的宽度等, 都能得到抑制高频噪声的效果。

#### 8. 时钟电路的防干扰设计

时钟电路在数字电路中占有重要地位, 也是产生电磁辐射的主要来源。一个具有 2ns 上升沿的时钟信号辐射能量的频谱可达 160MHz, 其可能的辐射带宽可达十倍频, 即能达到 1.6GHz。因此, 设计好时钟电路是保证达到整机辐射指标的关键。时钟电路设计主要的问题有如下几个方面:

(1) 阻抗控制 计算各种由印制板线条构成的微带线和微带波导的波阻抗、相移常数、衰减常数等。许多设计手册都可以查到一些典型结构的波阻抗和衰减常数。特殊结构的微带线和微带波导的参数需要用计算电磁学的方法求解。

(2) 传输延迟和阻抗匹配 由印制线条的相移常数计算时钟脉冲受到的延迟, 当延迟达到一定数值时, 就要进行阻抗匹配以免发生终端反射, 使时钟信号抖动或发生过冲。阻抗匹配方法有串联电阻、并联电阻、戴维南网络、RC 网络、二极管阵列等。

(3) 印制线条上接入较多容性负载的影响 接在印制线条上的容性负载对线条的波阻抗有较大的影响。特别是对总线结构的电路, 容性负载的影响往往是要考虑的关键因素。

时钟电路还有像时钟区等与其他功能区的隔离、同层板中时钟线的屏蔽等设计问题。

### 7.2.5.3 高频电路的干扰控制

#### 1. 高频电路的外界噪声及其抑制

许多工业设备本身就工作于高频段内, 它所辐射的电磁波直接影响高频电路, 即使是低频工作的装置或设备, 在电流或电压有强烈变化时, 也会向外辐射电磁波; 这些电磁波占据或使用的电磁波谱十分宽广, 对高频电路, 特别是接收机电路, 是一种直接的严重干扰。抗电磁波辐射干扰可采取以下措施:

(1) 将那些成为辐射源的装置或设备屏蔽隔离。

(2) 受扰设备内部采取抗干扰措施使辐射量降低。

(3) 通过国家行政法规对产生辐射的装置、设备规定辐射允许值, 正确划分使用无线电频谱, 压缩工作带宽, 限制无用发射电平, 以减少干扰影响。

高频电路中某些控制线有时要与其他电路相连, 这些电路的各种高频噪声很容易通过控制线传导给高频电路, 造成干扰。电源电缆是噪声传导的重要途径, 噪声可通过电源电网传导。由于传导干扰比相同距离的直接辐射强度要大得多, 所以危害性更大。抑制传导噪声最有的有效措施是串接滤波器。

#### 2. 接收机电路的几种干扰及其控制

##### (1) 组合频率干扰和副波道干扰

在高频电子设备中, 特别是无线电通信设备中, 常需将某一频率的信号变换到另一频率, 变频就是将信号和本地振荡信号加到非线性器件进行频率变换后取其差频。非线性器件本身既产生本振信号, 又实现频率变换, 称为变频器; 如本振信号由另外的器件产生, 则称为混



频器。在使用混频器时常会遇到各种非线性干扰,它将影响混频器的性能,甚至会严重影响整个设备的工作。混频器产生的非线性干扰重要的是组合频率干扰和副波道干扰。

① 组合频率干扰及其抑制措施。在混频器的输出中,除了所需的差额外,还存在着许多混波频率和组合频率。若组合频率处于中频放大器的通频带内,它会进入中频放大器,被放大后送到检波器上;由于检波器的非线性作用,会产生音频干扰,如在耳机中听到啸叫的噪声。抑制这种干扰的措施如下:

- a. 降低高频放大器的增益,合理选择混频器的工作状态。
- b. 合理选择中频,可有效减少这种组合频率干扰的点数。
- c. 采用二次变频的方法,以保证中放的增益及稳定性。

② 副波道干扰及其抑制措施。副波道干扰以中频干扰和镜像干扰最常见。中频干扰主要是由于前级电路的选择不好,干扰信号的频率接近中频频率时,被混频器及各级中频放大器放大,严重时会使电路不能正常工作。抑制中频干扰的措施是提高中频附近频段的选择性。

镜像频率干扰产生的原因是干扰信号的频率与正常接收的信号频率对于本振频率来说,成为镜像对称关系,即正常信号频率比本振频率低一个中频,干扰信号频率比本振信号高一个中频,这种频率的干扰信号也会产生音频式的啸叫声干扰。抑制这种干扰的措施如下:

- a. 提高前级电路的选择性,使干扰信号在进入电路时被衰减。
- b. 采用高中频,使镜像频率在电路的波段之外。
- c. 将接收信号同相位地加到两个混频器上,将本地振荡差  $90^\circ$  相位地也加到这两个混频器上。两个混频器的镜像频率成分接近差  $180^\circ$  相位,使之相互抵消大部分或一部分,达到减弱镜像干扰的目的。

#### (2) 交叉调制干扰及其抑制措施

当前级电路选择性不好时,会使干扰信号与正常信号同时被接收。当这两种信号都以音频方式调制时,由于晶体管放大器和混频器的非线性,会产生如干扰信号的调制信号转移到正常信号的载波上的交叉调制干扰现象。这种交叉调制干扰的产生,与干扰信号的频率无关,只要交叉干扰信号有一定的强度,就能进入前级电路产生干扰,所以它对电路的危害更大。

抑制交叉调制干扰的措施如下:

- ① 采用提高前级电路的选择性,减弱干扰信号的电压振幅。
- ② 改变晶体管工作点电流,让晶体管工作在线性项最小的区域。
- ③ 采用交流负反馈电路。

#### (3) 相互调制干扰及抑制措施

当几种干扰信号一起进入电路时,因放大器或混频器的二、三次或更高次项的非线性作用,使干扰信号相互产生混频,其结果有可能产生接近正常信号频率的干扰信号,与正常信号一起进行中频放大后,在检波器中产生差拍,形成啸叫音频干扰。

抑制相互调制干扰的常用措施如下:

- ① 采用倍频程带通滤波器以消除二次项非线性产生的相互调制干扰,采用半倍频或亚倍频带通滤波器可消除三次项非线性产生的相互调制干扰。
- ② 采用抑制交叉调制干扰的办法,如选择适当的工作电流、采用交流负反馈电路等。
- ③ 采用场效应晶体管做放大器和混频器。

#### (4) 阻塞干扰及抑制措施

强干扰信号被接收后,会破坏晶体管的工作状态,这种对电路产生的干扰称为阻塞干扰。如

果干扰电压很大, 晶体管的集电极会被击穿, 工作状态完全被破坏, 即进入完全阻塞的状态。防止阻塞干扰的措施如下:

- ① 提高前级电路的选择性, 减小干扰信号进入电路的机会或降低进入电路干扰信号的强度。
- ② 加交流负反馈, 扩大前级电路的动态工作范围。
- ③ 采用场效应晶体管等。

### 3. 高频电路抗干扰装配工艺

#### (1) 高频电路的实验组装

① 先将原理图换画成装配图。电原理图只要易看易懂、图形美观及制图方便即可, 而从普通的电原理图要想像出实际电路的构造是困难的, 尤其是高频电路, 与一般电路有很大的不同。它需要考虑引线长短及元器件安排等, 更需考虑电路实际情况。所以在实际装配之前应有一个指导装配的装配图, 在装配图上, 不仅应反映各元器件的装配位置, 还应指出某些重要线路如信号线、地线等的具体要求。

当然画成正规的更接近实际的装配图更好, 一般要在搭成电路完成调试后, 再根据实际情况画成正规装配图。

② 实际电路组装。在高频电路中, 原理图设计完成后, 即使改画成具有指导意义的装配图, 之后马上着手进行印制电路板 PCB 设计也具有较大风险。应根据装配图先组装一个实验电路进行性能试验, 然后考虑是否用 PCB 进行装配, 如用 PCB 装配, 则应尽量接近实验电路。

实验组装中应注意全部电路元器件都以最短距离布线、地线宽或粗、接点无高频损耗等。

#### (2) 高频电路印制线路装配

双面板 PCB 事先要进行铜箔表面电镀处理。聚四氟乙烯是制作印制电路板最好的材料, 其高频损耗小、介电常数以及印制线路之间的分布电容也小, 但其价格较高, 故一般只用在 300MHz 以上频率的特殊电路中。玻璃环氧基板价廉, 性能也较好, 被广泛使用, 若在装配上采取措施, 可用在 1GHz 频率左右。纸质环氧基板和电木基板, 因高频损耗大, 不适用于高频电路。

大平面接地布线方法在高频电路中被广泛采用。在装元件的一面, 除元件插孔外全部铜箔为接地面, 另一面的布线中就不必再设地线。另一面高频信号线不希望有分布电容的存在时, 可将信号线所对应的那部分接地铜箔除去。这种方式可以降低线路阻抗, 防止线路间的噪声耦合。

双面印制电路板使用金属化孔时, 所形成的电感有时会对电路造成一定的影响, 可适当放宽金属化的孔径。

#### (3) 高频电路装配中的屏蔽措施

① 防止前后级的反馈干扰。高频电路在装配上各零部件之间的屏蔽是十分重要的。有时即使采用了信号流直线型, 在高频辐射的影响下, 输入/输出或前级后级之间仍有耦合反馈, 此时, 可采用以下屏蔽措施予以解决。

- a. 屏蔽板直接焊在印制电路板上, 屏蔽板可用 0.3~0.8mm 的薄铁板, 表面镀锡, 以便焊接。
- b. 用螺钉将屏蔽板固定在印制电路板上, 适合于元件装配面为大平面接地式的印制电路板, 但要注意螺钉固定与地面接触的稳定性, 不但要清洗印制电路板铜箔与屏蔽板的接触面, 还要增加螺钉个数, 螺钉的表面镀层也应有较好的传导性能。

高频电路有时会通过直流供电电路或其他电路形成反馈而产生振荡。将高频电路用屏蔽板完全围起来, 直流偏置电路等用穿心电容穿过屏蔽, 这样可有效地防止干扰。

② 防止高频信号向外泄漏。要防止电路或装置所产生的辐射, 最好的办法是将电路或装置完全屏蔽起来, 尽管这样仍会形成各种高频泄漏的通道。为此, 可将表头用金属壳体屏蔽,

其引线通过两只穿心电容。将开关屏蔽，在开关的金属壳体 and 面板之间垫上一个导电衬垫。对 LED 发光二极管、数码管等，在面板和显示器之间用金属孔网进行屏蔽，金属孔网的材料可用黄铜及不锈钢等。此外，透明屏蔽薄膜是在高分子薄膜表面涂有一层导电膜而制成的，具有良好的屏蔽效果和透光率。

对高频电路的信号传输线，除防止本身受外界噪声影响外，也要防止它在传导时成为辐射源。当电缆的屏蔽效果不好时，可将电缆穿在金属电线管内使用，最适用的金属管是铜管和铝管。电线管要求有两点以上的多点接地，否则一点接地会成为一个天线。当信号电缆从屏蔽体引出时，要使用穿心电容。当使用插头座对电缆与装置进行连接时，要注意电缆线与插头座连接部分的屏蔽。

#### （4）高频电路元器件的选用注意事项

在高频时，由于集肤效应，电流流过导体的有效截面积减小，高频时的电阻比直流电阻大。所以高频电路宜采用多股细导线绞合而成的导线。

所有的电阻，无论结构如何，均会产生以热噪声为主的噪声。合成型电阻噪声最大，薄膜电阻其次，线绕电阻所产生的噪声最小，但具有很大的电感，在高频电路中一般不采用。金属膜比碳膜的电导率高，在 VHF 甚高频范围内，集肤效应小，有较好的频率特性，故被广泛采用。

高频电路中电容器的选用十分重要，要注意避免使用那种卷状结构的薄膜电容；尽量使用陶瓷电容；频率很高时，选用片状陶瓷电容。

## 第 8 章 屏蔽与滤波技术

### 8.1 屏蔽防护设计

#### 8.1.1 屏蔽类型及屏蔽效果

##### 8.1.1.1 屏蔽的概念及类型

屏蔽就是用电导或导磁材料制成盒、壳、板和栅等形式将电磁场限制在一定的空间范围内，使电磁场从屏蔽体的一面传到另一面时受到很大的衰减，从而抑制电磁场干扰的扩散。根据抑制功能不同，分为电屏蔽、磁屏蔽及电磁屏蔽。

(1) 电屏蔽 即静电或电场的屏蔽，用于防止或抑制寄生电容耦合，隔离静电或电场干扰。

(2) 磁屏蔽 即磁场屏蔽，用于防止磁感应，抑制寄生电感耦合，隔离磁场干扰。

(3) 电磁场屏蔽 用于防止或抑制高频电磁场的干扰。

##### 8.1.1.2 屏蔽效果

屏蔽效果  $S$  就是屏蔽前后空间同一点的场强之比，也称为屏蔽效能。其关系式为

$$S = \frac{E_0}{E_1} = \frac{H_0}{H_1} \quad (8-1)$$

式中， $E_0$ 、 $E_1$ 、 $H_0$ 、 $H_1$  分别表示屏蔽前后某点的电场及磁场强度。

屏蔽效果  $S$  值表示屏蔽前后的倍数，其范围很宽，直接表达起来不方便，可像放大器、衰减器计量增益、衰减一样，用分贝 dB 或奈培 NP 来计量，其关系式为

$$S_{\text{dB}} = 20 \lg \frac{E_0}{E_1} = 20 \lg \frac{H_0}{H_1} \quad (8-2)$$
$$S_{\text{NP}} = \ln \frac{E_0}{E_1} = \ln \frac{H_0}{H_1}$$

现在的屏蔽效果都用对数计量，一般在无线电设备中采用分贝，在有线电设备中采用奈培。分贝和奈培的换算关系为

$$1\text{dB}=0.115\text{NP}; 1\text{NP}=8.686\text{dB} \quad (8-3)$$

屏蔽效果与场强衰减的关系见表 8-1，表中场强单位为 V/m 或 A/m。

民用设备的机箱一般只需要 40dB 左右的屏蔽效果，而军用设备的机箱一般需要 60dB 以上的屏蔽效果。表 8-2 给出了不同屏蔽效果的评价。

**【例 8-1】** 某电子设备的金属机箱，能将外界干扰信号衰减 2000 倍，其屏蔽效果为多少分贝？换算成奈培为多少？

表 8-1 屏蔽效果与场强衰减的关系

屏蔽前场强	屏蔽后的场强	衰减量	屏蔽效果(dB)
1	0.1	0.9	20
1	0.01	0.99	40
1	0.001	0.999	60
1	0.0001	0.9999	80
1	0.00001	0.99999	100
1	0.000001	0.999999	120

表 8-2 屏蔽效果的评价

屏蔽效果 (dB)	评 价
0~10	屏蔽很少
10~30	有意义的屏蔽下限
30~60	平均屏蔽量
60~90	屏蔽较好
90~120	屏蔽很好
120 以上	现有技术的极限

解:  $S_{dB}=20\lg 2000=66\text{dB}$

$S_{NP}=0.115\times 66=7.56\text{NP}$

【例 8-2】电源变压器的漏磁场强度为 0.4A/m, 将变压器屏蔽后测得漏磁场强度为 0.1A/m, 求磁屏蔽效果。

解:  $S_{dB}=20\lg \frac{H}{H'}=20\lg \frac{0.4}{0.1}=12\text{dB}$

【例 8-3】载波电话在通话时, 有用信号与干扰信号之比为 7NP, 问有用信号是干扰信号强度的多少倍?

解:  $S=\ln^{-1}7=e^7=1\,096.6$  (倍)

## 8.1.2 电场屏蔽

### 8.1.2.1 电屏蔽原理

#### 1. 静电屏蔽

静电场感应和静磁场耦合都可以用屏蔽方法来抑制。设带正电荷的导体 A 邻近有导体 B, 则导体 B 将会由于静电感应而带负电, 如图 8-1 (a) 所示。图 8-1 (b) 中, 用金属屏蔽体将导体 A 包围起来, 此时在屏蔽体的内侧就感应出与导体 A 等量的负电荷, 在外侧出现等量的正电荷, 电力线继续到达导体 B, 而且使感应电场更为复杂。图 8-1 (c) 中, 将金属屏蔽体接地, 使屏蔽体的外侧电场消失, 导体 B 就不会受到感应干扰。这就是静电屏蔽的原理。

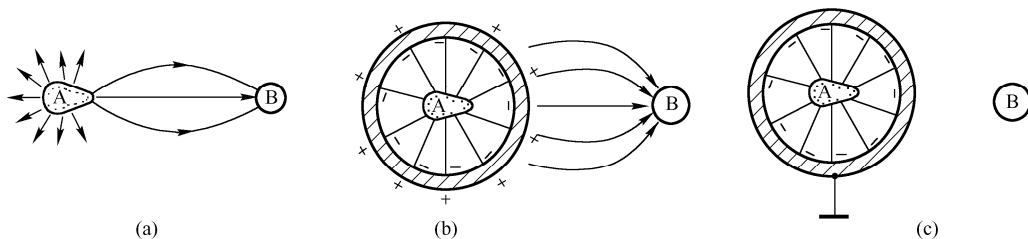


图 8-1 静电屏蔽原理

#### 2. 近场电屏蔽

近场区电屏蔽是为了抑制寄生电容耦合。最简单的方法是在感应源与受感器之间加一块接地良好的金属板, 就可把感应源的寄生电容短接到地, 达到屏蔽的目的。

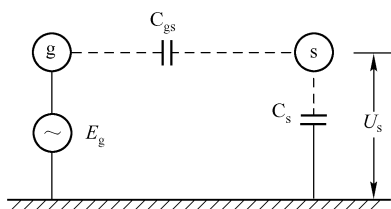


图 8-2 电场耦合

如图 8-2 所示, 设导体 g 上有一高频电压  $E_g$ , 在其附近还有一导体 s (感受器), 导体与地的分布电容为  $C_s$ , 导体 g 与导体 s 间的分布电容为  $C_{gs}$ , 则 g 在感受器 s 上产生的感应电压为

$$U_s = E_g \frac{C_{gs}}{C_s + C_{gs}} \quad (8-4)$$

如果在两导体间加入金属板, 并接地, 则 g 与 s 间的电容分布如图 8-3 所示。

分布电容  $C'_{gs}$  的值很小, 这时 s 上的感应电压为

$$U_s = E_g \frac{C'_{gs}}{C'_{gs} + C_2 + C_s} \quad (8-5)$$

如果接地金属板无穷大, 则  $C'_{gs}$  的值为 0, 比较式 (8-4) 与式 (8-5) 后发现: 电场干扰就被完全隔离。

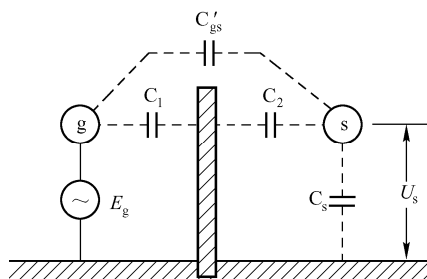


图 8-3 电场屏蔽

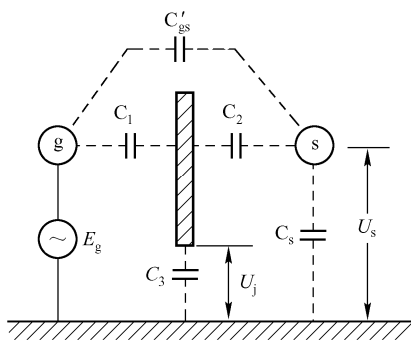


图 8-4 金属板不接地

如果金属板不接地, 见图 8-4, 分布电容  $C_3$  的值很小, 这时 s 上的感应电压为

$$U_s = E_g \frac{\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}{\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_s} \quad (8-6)$$

从式 (8-5) 与式 (8-6) 的比较中可以看出: 金属板不接地, 不仅没有起到电场屏蔽作用, 而更加增大了其间的耦合。如果金属隔板不是直接接地, 而是用连接导线接地, 那么随着频率升高, 连接导线感抗增大, 也会使电场屏蔽作用变坏; 导线愈细、愈长, 屏蔽作用越坏。

综上所述, 从场的观点看, 电屏蔽的实质是干扰源发出的电力线被终止于屏蔽体, 从而切断了干扰源与感受器之间电力线的铰链; 从电路的观点分析, 屏蔽体起着减小干扰源和感受器之间分布电容的作用。因此, 要想减少电场所引起的耦合, 可采用如下措施:

(1) 加金属屏蔽物, 并且有良好的接地。

(2) 使相互耦合的两导体或两元器件相互远离以减少  $C_{gs}$ 。

### 3. $\alpha$ 粒子及其屏蔽

$\alpha$  粒子是带两个正电荷的氦核。它的质量大、电离作用强, 在不同的介质中有不同的射程。例如,  $\alpha$  粒子在水中的射程比在空气中短得多。在同一介质中,  $\alpha$  粒子射程与其能量有关, 能量

越大,  $\alpha$  粒子的射程越长。介质密度越大,  $\alpha$  粒子射程越短。表 8-3 为不同能量的  $\alpha$  粒子在空气、生物组织和铝中的射程。

表 8-3 不同能量的  $\alpha$  粒子在空气、生物组织和铝中的射程

$\alpha$ 粒子能量 (MeV)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10
在空气中射程 (cm)	2.5	3.0	3.5	4.0	4.6	5.2	5.9	6.6	7.4	8.1	8.9	9.8	10
在生物组织中射程 ( $\mu\text{m}$ )	31	37	43	49	56	64	72	81	91	100	110	120	130
在铝中射程 ( $\mu\text{m}$ )	16	20	23	26	30	34	38	43	48	53	58	64	69

表 8-3 说明,  $\alpha$  粒子在物质中的射程很短, 例如, 对于有机组织和水, 一般  $\alpha$  粒子的射程仅为  $56.4\mu\text{m}$ 。所以很容易被屏蔽, 戴上手套就足以完全屏蔽一般的  $\alpha$  粒子。

#### 4. $\beta$ 粒子及其屏蔽

$\beta$  粒子是放射性核进行  $\beta$  衰变时放出的一种具有连续谱的正电子流或负电子流, 通常是负电子流。某些裂变产物如  $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{87}\text{Kr}$ 、 $^{88}\text{Rb}$  等在近处照射人体时, 可造成  $\beta$  烧伤。因此, 对于一些纯的或硬的  $\beta$  强辐射源, 必须考虑屏蔽问题。

由于高能  $\beta$  射线在重元素材料中会产生韧致辐射, 因此屏蔽  $\beta$  粒子应该采用低原子序数的材料, 如塑料、有机玻璃、铝等, 以减少韧致辐射, 通常采用内层衬铝的铅板或铁板。屏蔽厚度一般取  $\beta$  粒子最大射程。同  $\gamma$  射线和中子相比,  $\beta$  射线或电子的穿透能力很差, 屏蔽  $\beta$  射线很容易, 只要屏蔽材料厚度大于  $\beta$  粒子最大射程就能阻挡全部  $\beta$  粒子。所以只要几毫米厚的铝板就足以屏蔽  $\beta$  射线。

#### 5. $\gamma$ 射线的屏蔽

$\gamma$  射线是能量很高的电磁波。它们没有直接的电离和激发效应, 不能被直接探测到。但是它们在通过物质时, 由于它们和原子的核外电子或原子核存在电磁相互作用, 故会产生一些效应, 主要是光电效应、康普顿效应和电子对效应。前两种效应是  $\gamma$  光子与核外电子的作用结果, 后一种是与原子核电磁场的作用结果。这三种作用都会产生电子, 这些电子不是原来入射的电子, 常叫次级电子, 它们在探测器物质内会引起电离和激发效应。因此, 通过探测次级电子的电离和激发能够间接地探测到  $\gamma$  射线。 $\gamma$  射线探测器一般选取  $Z$  尽可能大的材料, 如无机闪烁晶体碘化钠  $\text{NaI (TL)}$ 、 $\text{Ge (Li)}$  半导体探测器等。

$\gamma$  射线的穿透本领与  $\alpha$ 、 $\beta$  射线比较起来要大得多, 即使在离开放射源较远的地方也能使人体受到照射。所以, 在外照射防护中, 最主要的防护因素之一是  $\gamma$  射线。

原则上任何材料对  $\gamma$  射线都有减弱作用, 都可以作为  $\gamma$  射线的屏蔽材料。然而, 因  $\gamma$  射线与介质原子的作用截面与介质的原子序数  $Z$  有关, 光电效应截面与  $Z^5$  成正比, 康普顿原子散射截面与  $Z$  成正比, 电子对效应截面与  $Z^2$  成正比, 所以用原子序数高的材料屏蔽  $\gamma$  射线更为有效。实际用于  $\gamma$  射线的屏蔽材料主要有铅、铁、混凝土和水。铅对  $\gamma$  射线的屏蔽效果最好, 但结构性能差, 容易变形, 而且价格较高, 适宜于做活动屏蔽体。

屏蔽材料对  $\gamma$  射线的屏蔽性能以  $\gamma$  射线经过屏蔽材料, 其照射量率降低为无屏蔽时的一半时的半值层厚度来表示 (见表 8-4)。

表 8-4  $\gamma$  射线的几种主要屏蔽材料半值层厚度

	铅 (cm)	铁 (cm)	混凝土 (cm)	水 (cm)
对窄束 $^{137}\text{Cs}$ $\gamma$ 射线的半值层	0.55	1.25	4	8.4
对窄束 $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ 射线的半值层	1.05	1.60	5.5	11

### 8.1.2.2 电屏蔽的设计要点

#### 1. 屏蔽体必须良好接地

电屏蔽体接地质量对屏蔽效能影响极大。一般要求屏蔽体与地的连接电阻小于  $2\text{m}\Omega$ ，在严格的场合下要求连接电阻小于  $0.5\text{m}\Omega$ 。如果屏蔽体通过接插件接地，必须用多对接插孔并联以减小接地电阻。屏蔽体通过导线与地相连时，导线横截面及其周界都应适当大些。例如，用扁铜条和编织线，以减小直流和交流电阻。同时要尽量缩短导线的长度，以减小导线的感抗。导线两端最好用焊接。如用螺钉连接时，应采用内齿弹性垫圈或外齿弹性垫圈，如图 8-5 所示，以减小连接电阻。为了使接地稳定可靠，对接地点的腐蚀问题应予以充分注意。

#### 2. 正确选择接地点

图 8-6 表示干扰源 A 和感受器 B 之间加入屏蔽体 S，A、B 的接地点分别为  $G_A$ 、 $G_B$ 。当屏蔽体的接地点  $G_S$  选在  $G_A$  和  $G_B$  的中间时，由于地线不是理想导体，地电流会在  $G_S$  和  $G_B$  间产生电位差  $U_g$ 。 $U_g$  通过 S、 $C_B$  和  $Z_B$  构成回路，结果地电流的干扰串入  $Z_B$ 。为了减小  $U_g$  的影响，屏蔽体的接地点  $G_S$  应靠近被屏蔽的低电平元件的入地点  $G_B$ 。

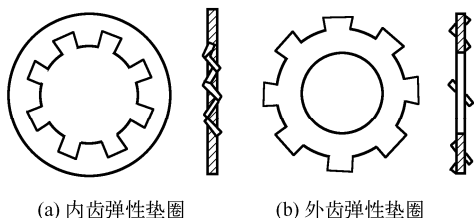


图 8-5 内外齿弹性垫圈

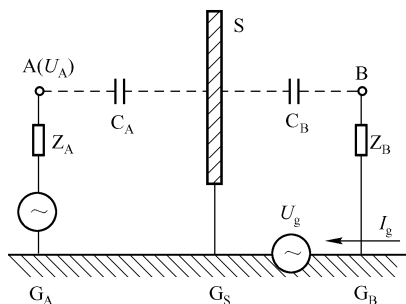


图 8-6 屏蔽体接地点的选择

#### 3. 合理设计屏蔽体的结构

影响电屏蔽效能的另一个因素是剩余电容，减小剩余电容就能提高屏蔽效能。为此，盒形屏蔽体比板状的要好；全密封的优于开有窗孔和缝隙的。为获得高屏蔽效能，要尽量缩小开孔面积和减少开孔数量。

##### (1) 单层盖结构

封闭的屏蔽盒和机箱至少是两个零件的组合物。要取得很好的屏蔽效能，必须使组合物各部分之间的接触电阻减至最小。在盒体之间可安装梳形簧片，以增加盒盖与盒体间的接触点，这种方法可用于需要经常启、闭的屏蔽盒盖、屏蔽室或方舱的门缝。为便于保养和维修，可采用钎焊固定，以求最大限度地减小安装电阻，确保屏蔽效能稳定。

屏蔽体表面涂覆处理时，应确保电连接表面的金属裸露；装配前必须清除连接面上的绝缘保护层和氧化层，并用有机溶剂（如酒精、四氯化碳等）将接触面上的油垢及灰尘除去，以保证良好的电连接。

##### (2) 双层门盖结构

图 8-7 为某高频屏蔽盒的双层盖结构。采用双层屏蔽盖结构可以进一步提高屏蔽的效能，这是因为盒体的内表面与屏蔽盖构成一个屏蔽盒，而盒体的外表面与外层屏蔽盖又构成了一个屏蔽盒。因此，可以大大提高屏蔽效果。

每一层盖依然要采取改善电连接的措施，图 8-7 中每层盖都采用梳形簧片改善电连接。两层



盖中央应避免直接接触,当两盖间距很小时,盖间要垫绝缘层。为便于装配,可以借助外盖和内盖绝缘层的弹性将内盖压紧,省去内盖的紧固件。

### (3) 屏蔽盒的共盖与分盖结构

在电子设备的高频多级放大电路中,常有多个级联电路共用一个屏蔽盒,中间用隔板将各级电路隔开,以减少其间的寄生耦合。这类屏蔽盒的盒盖处理方法是共用一只盖子,或是每个分格各自用一只盖子。图 8-8 (a) 为在有一个隔板的屏蔽盒内采用一个屏蔽盖;图 8-8 (b) 为采用两个分开的屏蔽盖。从等效电路看,共盖与单层盖结构是相同的;分盖结构与双层盖结构相同,其屏蔽效能优于共盖结构。

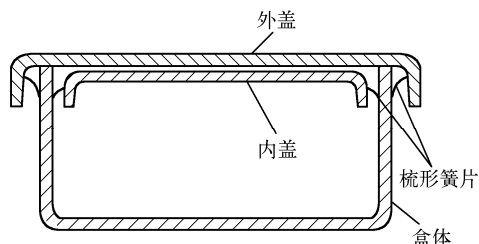


图 8-7 双层屏蔽盖结构

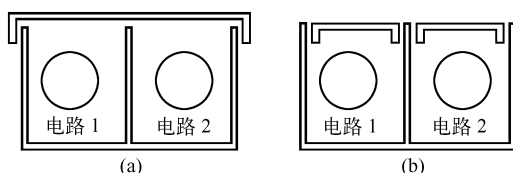


图 8-8 有隔板的屏蔽盒体

为提高共盖结构的屏蔽效能,可在中间隔板上预加专用螺母,再用紧固螺钉减小缝隙和改善盖子与隔板的电连接,如图 8-9 所示。

### 4. 注意屏蔽体材料的选择

电屏蔽分析往往把屏蔽体当作理想导体。实际屏蔽体具有一定的阻抗,屏蔽体自身阻抗愈大,其屏蔽效能愈差。所以屏蔽体应选用良导体,如铜、铝等。高频时,屏蔽体表面应镀银,以提高屏蔽效能。电屏蔽体的厚度取决于工艺需要。

#### 8.1.2.3 变压器的电屏蔽

变压器的初、次级绕组之间存在着较大的分布电容,一个绕组中高频成分的能量会通过分布电容串入另一个绕组造成干扰,若在两绕组间加一电屏蔽层并接地,可减少它们的寄生耦合,如图 8-10 所示。

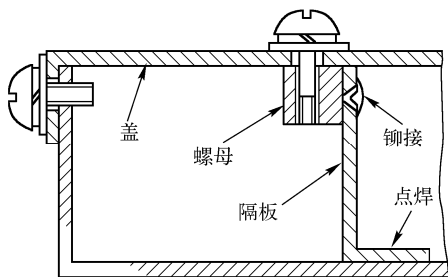


图 8-9 隔板上的专用螺母

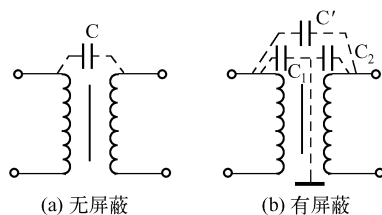


图 8-10 变压器的屏蔽

为了取得好的屏蔽效果,必须注意屏蔽接地引线的连接质量。为此,一般采用带状引线,而不用圆截面线。引线 with 屏蔽层应采用焊接,以保证屏蔽层有最小的接地阻抗。另外,绕组间越过屏蔽层还有剩余电容  $C'$ ,要使  $C'$  的值尽量小,才能取得好的屏蔽效果,可以从屏蔽层的结构形状上采取一些措施。下面介绍几种不同的电屏蔽结构。

### (1) 带状屏蔽

绕组间带状屏蔽又称为法拉第屏蔽,即在初级绕组完成之后,在初级绕组外面绕一层铜箔或铝箔并接地,如图 8-11 所示。为了防止铜箔在重合搭接处连通构成变压器的短路匝,在重合搭接处要垫以绝缘带条。

这种屏蔽结构应用最为广泛,原因是工艺性较好,便于制作。但在绕组的上下两端绕组间越过屏蔽的剩余电容较大。剩余电容  $C'$  的值对小功率电源变压器来说,约为  $100\text{pF}$  的量级,屏蔽效果不够好,所以常在两绕组入端和出端各加滤波器以弥补屏蔽效果之不足。

### (2) 双重屏蔽

为了减小带状屏蔽的剩余电容,在次级绕组的外层再按带状屏蔽的绕制方式加一层屏蔽,其结构如图 8-12 所示。外屏蔽层的宽度仍与绕组的宽度相等,内外两层屏蔽层引出线在线包外并联后再接地。

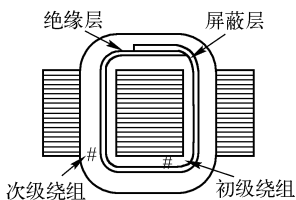


图 8-11 初级绕组外面绕一层铜箔或铝箔并接地

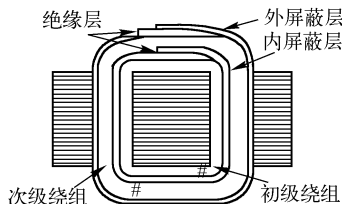


图 8-12 双重屏蔽

双重屏蔽的结构简单、加工方便、屏蔽效能比带状屏蔽有明显提高。如对一个  $60\text{W}$ 、E 型铁芯的电源变压器进行实测的结果,显示仅采用带状屏蔽时,初次级间的剩余电容为  $44\text{pF}$ ;采用双重屏蔽后剩余电容减小为  $16\text{pF}$ 。上述测试数据都是在屏蔽层接地良好的情况下测得的,若屏蔽层不接地,则测得初次级的分布电容骤增至  $192\text{pF}$ ,可见确保屏蔽层良好接地十分重要。

### (3) 外折屏蔽

图 8-13 示出绕组间的外折屏蔽。外折屏蔽是针对带状屏蔽存在较大剩余电容所作的改进。这种屏蔽方式是这样做成的:在初级绕组外面绕的铜箔宽度大于绕组的宽度,当次级绕组制作完之后,将铜箔高出绕组的部分沿骨架四个棱边方向剪开,并向外弯折包住次级绕组,形成所谓外折屏蔽。

外折屏蔽只是在每一个端面的四角还有些剩余电容,对小功率电源变压器,约为  $10\text{pF}$  量级。外折屏蔽的效果比带状的好,但工艺性及外观不如带状屏蔽和双重屏蔽,而且折弯的铝箔与绕组两端的导线间容易发生电击穿。

### (4) 封闭屏蔽

图 8-14 示出封闭屏蔽。封闭屏蔽不是绕在初级绕组外面,而是将次级绕组用铜箔全包封,再根据初级绕组的尺寸做一个胎具,次级绕组在此胎具上绕制完后脱胎出来,然后将次级绕组用铜箔带穿绕封闭(图中绘出的只穿绕了局部)。但必须注意,在穿绕起点与终点封闭处要垫以绝缘层,以防止屏蔽构成短路匝。初级绕组也同样用胎具先绕制成,待封闭屏蔽完成后,再将次级绕组套在初级绕组外面,以备与磁路组装。

对小功率电源变压器而言,封闭屏蔽能将绕组间剩余电容减至皮法量级,是当前屏蔽效果最好的结构形式。然而封闭屏蔽制作起来是很费工的,只宜应用在要求屏蔽效果极高的个别场合。

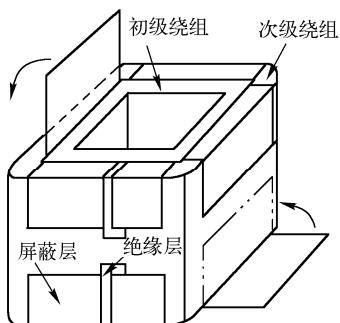


图 8-13 外折屏蔽

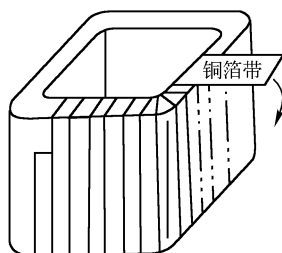


图 8-14 封闭式屏蔽

### (5) 超级隔离

采用三重屏蔽技术的交流电源超级隔离器，不但把变压器初、次级分别进行封闭式屏蔽，而且在初、次级之间又采用了法拉第屏蔽，使电源和负载之间实现非常有效的隔离。其主要技术指标为：对单相电源的相线与中线之间的干扰，在 1kHz 时衰减大于 3dB，每 10 倍频程衰减增加 20dB；200kHz 以上，衰减不小于 50dB。在输出端并联一个电容器，对噪声有进一步的抑制能力。这类超级隔离器对相线与地线的共模噪声衰减可大于 140dB，在抗干扰电源设备中得到广泛应用。

#### 8.1.2.4 印制导线的屏蔽

图 8-15 (a) 为单面印制板，在信号线之间设置接地的印制导线以起屏蔽作用。图 8-15 (b) 为双面印制板，除在信号线之间设置接地导线以外，其背面铜箔也接地。

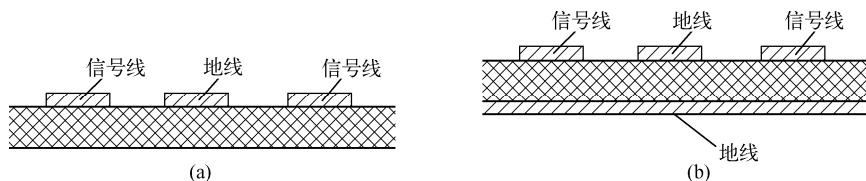


图 8-15 印制板的屏蔽线

#### 8.1.2.5 扁平电缆的屏蔽

图 8-16 为导条扁平电缆剖面图。图中可用任一导条接地形成电屏蔽，以减小屏蔽条两边线间的电场干扰。

图 8-17 为导线扁平电缆剖面图。这种电缆，距离较近的每三条线形成一组。每一组的中间导线传输信号，两边的导线接地作电屏蔽用。当然也可将三根导线并联用以传输信号而不要屏蔽，或用另一组导线做屏蔽。

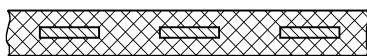


图 8-16 导条扁平电缆



图 8-17 导线扁平电缆

### 8.1.3 磁场屏蔽

载流导体或线圈周围都会产生磁场，如果电流是随时间变化的，则磁场也随时间变化，这种变化的磁场往往会对周围的敏感元件、电路造成干扰。在电子设备内各电路单元间的连接线和信

号线等难免会构成环形布线。弱信号环路很易受到周围交变磁场的干扰；而强信号回路易造成磁场发射，对其他敏感电路产生影响。

在采用变压器耦合的低频放大电路中，当输出变压器的漏磁交连到输入变压器时，会造成电路工作不稳定，甚至引起自激的啸叫声。

若有线圈处在干扰磁场范围内，且线圈轴线与磁场并不互相垂直，则线圈中将产生感应电势。

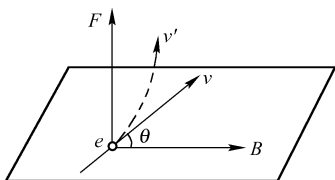


图 8-18 电子在磁场中运动时方向的偏离

当干扰磁场较强时，小信号电路中使用的磁芯线圈内还可能由此产生调制干扰。

电子设备中的阴极射线管（CRT）是对磁场最为敏感的器件之一，其电子束在磁场中所受的洛仑兹力  $F$  如图 8-18 所示，它与  $B$ 、 $v$  所在平面垂直。电子在力  $F$  的作用下，轨迹将发生弯曲，使显示的字符或图像发生颤动、扭曲，甚至变色。

### 8.1.3.1 低频磁场的屏蔽

#### 1. 屏蔽原理

在电子设备中，低频磁场干扰是一个棘手的问题，其原因是磁屏蔽体的屏蔽效能远不如电屏蔽和电磁屏蔽。对于低频磁场（包括恒定磁场）屏蔽，涡流的屏蔽作用很小，主要有赖于高磁导率材料所具有的高磁导率起磁分路作用。当工作频率低于 100kHz 时，磁场屏蔽常用高磁导率的铁氧体材料（如铁、硅钢片、坡莫合金等），其原理是利用铁磁材料的高磁导率对干扰磁场进行分路。

磁场有磁力线，磁力线所通过的路径称为磁路，磁路具有磁阻，大小与磁路的长、磁路的截面积及相对导磁系数（相对磁导率即金属的磁导率与空气磁导率的比）有关。磁导率越大，磁阻就越小。由于铁磁材料的磁导率比空气的磁导率大得多，所以铁磁材料的磁阻很小。将铁磁材料置于磁场中时，磁通将主要通过铁磁材料，而通过空气的磁通将大为减小，从而起到磁场屏蔽作用。

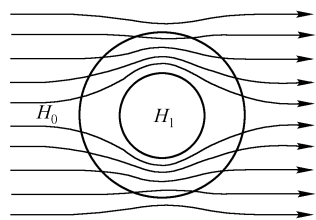


图 8-19 磁屏蔽原理

图 8-19 所示为一高磁导率材料制成的屏蔽体（空心长圆筒）置于均匀磁场中的情况。由于屏蔽体壁的磁阻小，磁力线大部分沿着壁内通过，穿入屏蔽体内腔的磁力线很少。屏蔽体的磁导率越高、壁层越厚，则磁分路作用愈加明显，磁屏蔽效能愈好。

#### 2. 屏蔽材料

如前所述，磁屏蔽需要高磁导率材料，满足这种要求的材料是铁镍合金，这种材料具有很高的磁导率。一种常用的合金的化学成分如表 8-5 所示。这种材料在正确热处理的条件下，起始磁导率（直流，磁通密度

表 8-5 常用合金的化学成分

成分	Ni	Mo	Mn	Si	Fe
含量 (%)	80	4.2	0.5	0.35	其余

为 40Gs) 可达到 60 000H/m，最高磁导率可达到 400 000H/m。

磁导率并不是固定不变的，它会随外加磁场、频率等变化。不同厚度的材料，其频率特性也不一样，较厚的材料磁导率随频率下降更快一些。磁导率与外加磁场强度有关，当外加磁场强度较低时，磁导率随外加磁场的增加而升高，当外加磁场强度超过一定值时，磁导率急剧下降，这时称材料发生了饱和。材料一旦发生饱和，就失去了磁屏蔽作用。材料的磁导率越高，越容易饱和。因此，在很强的磁场中，磁导率很高的材料可能并没有

良好的屏蔽效能。在选择材料时,关键点选择同时具有适当饱和特性且有足够磁导率的材料。表 8-6 给出了一些常用合金的磁特性。

### 3. 磁屏蔽的结构

磁屏蔽是通过屏蔽盒(罩)的高磁导性能,即低磁阻来实现的。屏蔽盒一般由板料用钣金工艺加工或冷冲成型的,结构上难免含有接缝或通风、观察用的孔洞。接缝和孔洞的存在都会引起屏蔽体磁阻的增加,降低屏蔽效能。若能在设计时仔细考虑屏蔽体的接缝与孔洞的处理,则可减小它们对屏蔽效能的影响,具体实施要点如下:

#### (1) 合理布置接缝与磁场的相对方位

在屏蔽体壁内,当屏蔽体的接缝与磁通流经方向垂直时,所呈现的磁阻就会增加,屏蔽效能明显下降。当屏蔽体的接缝与磁通流经方向平行时,则磁阻的影响很小。因此,在设计磁屏蔽体的结构时,必须使屏蔽体的接缝与壁内磁通的流经方向尽可能平行。图 8-20 为 E 型铁芯电源变压器的屏蔽盒,左图中屏蔽盒接缝全部切断了漏磁通途径,不恰当。右图中中屏蔽盒接缝大都顺着漏磁通途径,是恰当的。

表 8-6 常用合金的磁特性

材 料	饱和强度 (Gs)	磁导率 (H/m)	
		最 高	起 始
铁磁合金 (80%镍)	8 000	400 000	60 000
铁磁合金 (48%镍)	15 000	150 000	12 000
硅钢	20 000	5 000	3 000
碳钢	22 000	3 000	1 000

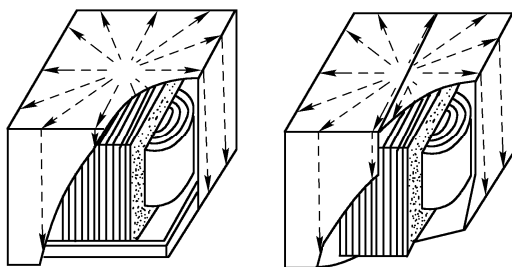


图 8-20 磁屏蔽盒接缝的布置

#### (2) 正确布置通风孔

屏蔽盒上为被屏蔽对象散热所开的通风孔形状与布置要尽可能减小屏蔽体磁阻的上升。图 8-21 中磁场方向如箭头所示,图(a)中矩形通风孔大大减小了磁路的横截面积,不恰当;图(d)中圆形通风孔排列增加了磁路长度,也不恰当。

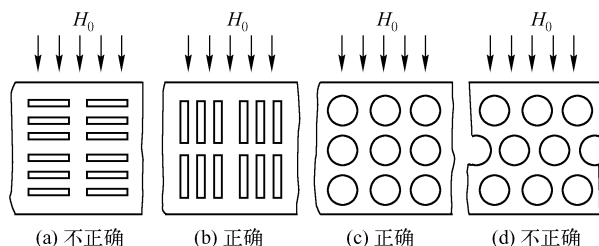


图 8-21 通风孔洞的布置

图 8-22 所示的屏蔽线圈采用铁磁材料作屏蔽罩。图(a)中线圈是一个干扰源,所产生的磁力线主要沿屏蔽罩通过,从而使线圈周围的电路或元件不受线圈磁场的影响。图(b)中线圈是一个受感器,外界磁场将被屏蔽隔离,从而使线圈不受外部磁场的影响。

#### (3) 合理的工艺设计

屏蔽体的磁导率越高,屏蔽层越厚,磁屏蔽的效果就越好。但是,在垂直于磁力线方向不应开口或有缝隙。因为若缝隙垂直于磁力线,则会切断磁力线,使磁阻增大,磁屏蔽效果变差。

接缝的连接工艺及结构对屏蔽效能的影响较大,应根据使用要求合理地设计。常用的连接方式有熔焊、点焊、铆钉和螺钉连接。熔焊时应采用与本体材料相同的焊条,使接缝具有最佳的屏蔽性能。点焊和铆接时,在接缝处应有足够的重叠。实测表明,当重叠部分为 9mm、点焊间距为 12mm 时,接缝对磁屏蔽效能的影响几乎可不予考虑。螺钉连接时,在交接处同样应有足够的重叠和尽可能小的螺钉间距。

高磁导率材料在机械冲击的条件下会极大地损失磁性,导致屏蔽效能下降。例如坡莫合金,经机械加工后未经退火处理时的磁导率仅为退火后磁导率的 5% 左右。因此,屏蔽体在经过机械加工后,如敲击、焊接、折弯、钻孔等,必须经过热处理以恢复磁性。热处理要在特定条件下进行,一般要在干燥氢气炉中以一定的速率加热到 1 177℃,保持 4h,然后以一定的速率降温到室温。由于热处理的条件极其严格,因此最好是委托材料厂家进行屏蔽体的加工,在工件完成后,进行热处理。

有一种加工后磁特性几乎不发生变化的新型磁性材料——镍基非晶态材料,它是用同族化学元素采取速冷法制成的一种非晶态结构的合金。镍基非晶态带材,工艺简单,可以直接粘贴于接缝;也可用不同层数的箔带材料卷绕成型,层数愈多,屏蔽效能愈好,图 8-23 给出了厚度 0.05mm 的 FJ131 非晶态带材用于屏蔽 50Hz 磁场的实例。这种非晶态带材经弯曲和机械加工后,不需重新进行热处理,其屏蔽性能可与坡莫合金相媲美。

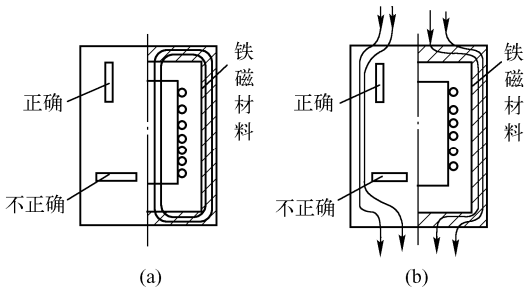


图 8-22 低频磁场的屏蔽

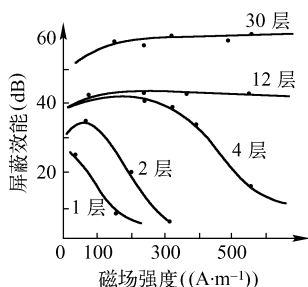


图 8-23 非晶态带材的屏蔽效能

在对拼接处进行焊接时,要使用屏蔽材料母料做焊接填充料,这样可以保证焊缝处的高磁导率。如果屏蔽效能要求较低,也可以采用点焊或铆接的方式固定,但要注意拼接处的屏蔽材料要有一定的重叠,以保证磁通路上有较小的磁阻。

#### (4) 双层磁屏蔽

当需要屏蔽的磁场很强时,仅用单层屏蔽材料,不是达不到屏蔽要求,就是会发生饱和。这时,一种方法是增加材料的厚度。增加屏蔽体壁厚虽能增加屏蔽效能,但屏蔽体厚度一般不宜超过 2.5mm,否则加工成型困难,结构也显笨重。当屏蔽效能要求较高时,不宜单纯增加盒壁厚度,而是采用双层屏蔽结构,它能在体积重量增加不多的情况下显著提高屏蔽效能。例如,高分辨率和高灵敏显示系统的显像管对磁场极为敏感,常需对之进行双层磁屏蔽。

图 8-24 给出双层圆筒屏蔽效能的一组实测曲线。它是在恒定磁场下测得的,圆筒尺寸如图中所示。由

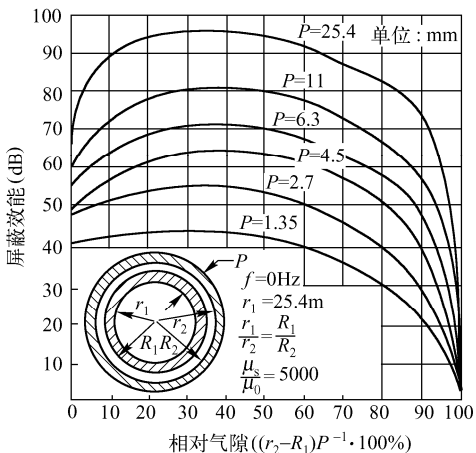


图 8-24 双层同心圆筒的屏蔽效能

图可较直观地分析双层磁屏蔽体结构与屏蔽效能的关系。在屏蔽体总厚度（包括两屏蔽层间的空气隙）不变的情况下，气隙约为总厚度  $P$  的  $1/3$  时将获得最大的屏蔽效能。屏蔽体总厚度越大，屏蔽效能越好。当  $P$  为  $1.35\text{mm}$  时，用  $0.3\text{mm}$  厚的材料制成的双层圆筒屏蔽与用  $1.35\text{mm}$  厚的同样材料制成的单层圆筒的屏蔽效能几乎相等，而重量约减轻一半。当  $P$  为  $6.3\text{mm}$  时，用  $0.8\text{mm}$  厚的双层圆筒屏蔽比用  $6.3\text{mm}$  厚同样材料制成的单层圆筒的屏蔽效能更好，但重量仅为后者的  $1/3$  左右。

双层屏蔽的内外屏蔽层可以用相同材料制成，亦可用不同材料制成。对强磁场进行屏蔽，且屏蔽效能要求较高时，则内外层应采用不同的铁磁性材料。若要屏蔽外部的强磁场，外层选用饱和磁感应强度高的材料，使其在强磁场作用下不致饱和。内层可采用饱和磁感应强度低的高磁导率材料。若要屏蔽内部强磁场，则材料排列次序与上述相反。内外屏蔽层的固定要确保层间磁绝缘。当内屏蔽层没有接地要求时，可用绝缘材料做支柱；如果要求接地，则可选用非铁磁性金属兼作接地支柱。

#### 4. 减小磁场干扰的其他措施

磁屏蔽是抑制磁场干扰最为有效的措施，但屏蔽会使结构复杂，体积、重量增加，成本提高，甚至使发热元件散热困难。下面几种抑制低频磁场干扰的措施，效果虽不如屏蔽那么显著，但结构和工艺简单，成本低，因此被广泛采用。

##### (1) 漏磁短路环

变压器的铁芯由铁磁材料制成，磁通绝大部分在铁芯中形成闭合回路，但有小部分磁通（称漏磁通）穿过周围空间而造成干扰。这将会影响其附近电子设备的正常工作，如使放大器产生调制交流声等。因此必须对变压器进行屏蔽。图 8-25 给出用紫铜带做成漏磁短路环的例子。漏磁通在环内感生涡流，而涡流所产生的磁场与漏磁场反向，所以短路环减小了漏磁场对外界的干扰。

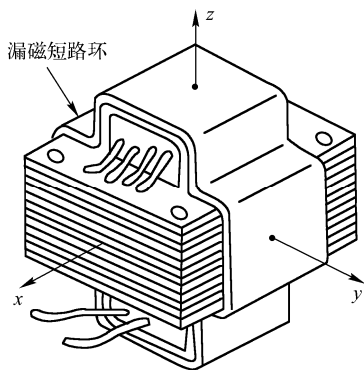


图 8-25 变压器漏磁短路环

##### (2) 变压器铁芯外侧包薄钢板

把变压器全部屏蔽起来效果虽好，但结构复杂、散热困难。简单的方法是用薄钢板把变压器铁芯外侧围起来，对减小铁芯接缝漏磁很有效。包的层数越多，屏蔽作用愈好。有些变压器就将此外包钢板兼作安装架用。

侧面包铁皮如图 8-26 所示。漏磁通在环内感生涡流，而涡流所产生的磁场与漏磁场反向，所以短路环减少了漏磁场对外界的干扰。

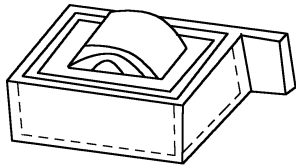


图 8-26 电源变压器的屏蔽

##### (3) 控制干扰场源与被干扰元件的距离及相对方位

电源变压器或其他类型的干扰场源所产生的干扰场强随距离增大而减小。对低频磁场敏感的元器件应避开干扰场源，例如电子设备中的电源变压器及其他磁场干扰源的配置应远离阴极射线管。图 8-27 说明了干扰磁场方向对干扰效果的影响：螺旋线圈轴线与磁场垂直时，干扰磁场在线圈内的感生电势为零，不产生干扰；磁场与电子的运动方向平行时，电子受到干扰磁场的力（洛仑兹力）为零，也不造成干扰。可见调整被干扰元件与干扰场的相对方位，同样能减小干扰。

此外，需注意电源变压器漏磁衰减程度与安装材料有关。变压器安装在铁磁性材料（如薄钢板）上时，漏磁随距离的增大而缓慢减小；若安装在非铁磁性材料（如铝、铜或绝缘材料）上，

漏磁将随距离的增加迅速减小。从减小电源变压器漏磁考虑, 安装板采用非铁磁性材料较好。

#### (4) 交叉扭绞布线和双绞线

图 8-28 (a) 给出了信号源向负载传输信号的回路。在该回路所包围的面积内有交变干扰场穿过时, 回路中会产生感应电动势。该电动势将叠加到信号上, 进而在负载上产生响应。反之, 若该信号源与负载间构成一个强信号回路, 则在其周围必然产生干扰场。把信号源与负载间的布线改成如图 (b) 所示结构, 由于构成了两个面积相等的交叉回路, 它们在外磁场作用下所产生的感应电势及伴生的感应电流方向相反、大小相等。由于干扰产生的感应电流在负载上互相抵消, 于是就减小了干扰的影响。

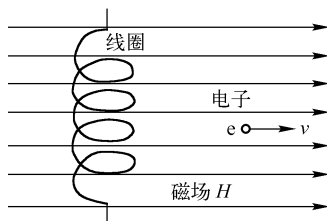


图 8-27 干扰场方向的影响效果

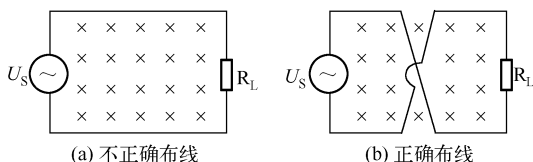


图 8-28 交叉布线减小干扰

电源（或信号源）采用软导线连接时, 可按交叉布线的原理把两根连接导线扭绞成双绞线, 又称麻花线。这种双绞线在低频传感器信号连接线和电源电路中被广泛采用, 它具有很好的抗干扰能力和抑制对外界产生干扰的能力。在双绞线的基础上, 现已开发了三绞线与多绞线, 有的外面还加有屏蔽套, 对磁场干扰抑制能力较强, 可供设计时选用。

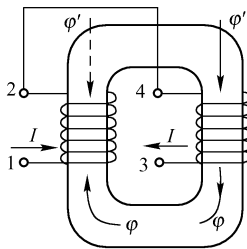


图 8-29 抗干扰变压器示意

#### (5) 抗干扰变压器

传输低电平信号的变压器易受外磁场干扰, 采用环形磁路 and 对称绕组, 可以提高其抗磁场干扰的能力。这种变压器统称为抗干扰变压器。图 8-29 是抗干扰变压器的示意图。其绕制方法是在环形磁路的两边各绕初级绕组的一半, 次级绕组也在两边各绕绕组的一半。图 8-29 中只绘出了初级绕组。两边绕组的绕向相同, 两绕组的始端（或末端）相接, 另两个端头作输出用。

当传输的信号电流  $I$  流经绕组时, 两边绕组在磁路中产生的磁通同向相加, 相当于两个绕组串联叠加的效果。如果变压器受到均匀的外磁场干扰, 则外磁场流经磁路两边的磁通是相等的, 因而在两边绕组中产生幅值相等、相位相反的电势, 最后在引出端合成的感生电动势相消为零, 这就抑制了外磁场在该变压器引出端的响应。

在电子设备中, 利用抗干扰变压器原理制成的电源变压器能有效地抑制漏磁通。将对称绕制的两个绕组分别装在 C 型铁芯上, 可构成一个具有抑制漏磁能力的电源变压器。其机理是两个绕组在变压器周围所产生的漏磁通方向相反, 大小近乎相等, 危害明显抵消。重要的条件是两绕组必须严格对称, 绕组端子连接正确。对称绕制是一项费效比极佳的工艺措施, 在许多电子设备上已获得较好的应用效果。

#### (6) 减小电源变压器自身的漏磁

电子设备中电源变压器的漏磁是一个重要的磁场干扰源。在进行电源变压器设计时, 应对变压器的漏磁予以重视。特别是对于那些含有磁敏感元件的设备, 应以减小漏磁作为变压器设计的依据之一。这样做虽然会提高变压器的成本, 但由于简化了屏蔽设计, 甚至为缩小整个设备的体积创造了条件, 综合效费比可能反而提高了。在变压器设计和制造中, 为减小变压器本身的漏磁



可采取下列措施:

① 正确选用铁芯结构。这是减小变压器漏磁的重要途径。铁芯结构有 E 型和 C 型两种基本形式。图 8-30 和图 8-31 分别为 E 型铁芯和 C 型铁芯的变压器及其漏磁分布。这里 C 型铁芯变压器是按抗干扰变压器的原理绕制的。若两绕组完全对称, 在  $x-z$  对称面内两个绕组漏磁场的合成矢量相互抵消, 在空间其他任意点的合成矢量也比单一绕组在同一点的漏磁场要弱得多。在伏安数相同的条件下, C 型对称绕制变压器的漏磁场通常低于 E 型的漏磁。

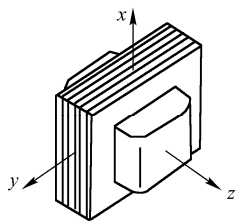


图 8-30 E 型变压器及其漏磁

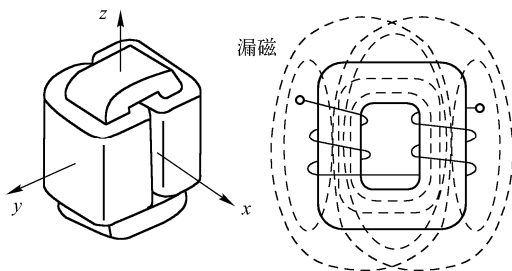


图 8-31 C 型变压器及其漏磁

② 选用优质材料作铁芯。变压器的铁芯本身可看作是一个磁屏蔽体。如能选用优质铁磁材料作铁芯, 并在加工成型后进行正确的退火处理, 便可获得磁导率很高的铁芯, 使变压器固有漏磁显著下降。

③ 正确选用铁芯材料的参数。在变压器设计中, 对于所用的铁芯材料应取其饱和磁感应强度的下限值。例如。冷轧硅钢片的磁感应强度  $B_m = 1.2 \sim 1.6 \text{ T}$ , 设计时应取  $B_m = 1.2 \text{ T}$ , 或更小些。这样虽然会使变压器成本和重量有所增加, 但由于减小了漏磁, 简化了屏蔽、散热等措施, 实际提高了效费比。

④ 减小铁芯接合处的间隙。铁芯接合处的间隙会影响铁芯磁路的磁阻, 尤其是整体对合装配的 C 型铁芯, 漏磁对间隙极为敏感。图 8-32 为某 C 型变压器铁芯接合处间隙改变时, 在  $x=0$ 、 $z=0$ 、 $y=7.5 \text{ cm}$  处 (坐标见图 8-31) 测得的漏磁场。因此 C 型铁芯的结合端面应进行精磨加工, 装配时保持对接面清洁, 并采用可靠的紧固结构。

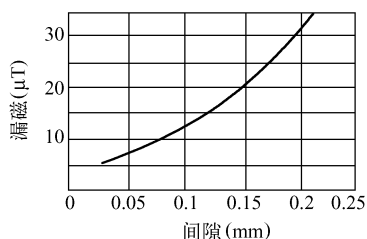


图 8-32 C 型铁芯接合间隙对漏磁的影响

### 8.1.3.2 高频磁场的屏蔽

#### 1. 屏蔽原理

高频磁场屏蔽采用的是低电阻率的良好导体材料, 如铜、铝等。它是利用电磁感应现象在屏蔽壳体表面所产生的涡流的反磁场来达到屏蔽目的, 也就是说, 利用了涡流反磁场对于原干扰磁场的排斥作用。

根据法拉第电磁感应定律, 闭合回路产生的感应电动势等于穿过该回路的磁通量的变化率。感应电动势引起感应电流, 感应电流所产生的磁通要阻止原来磁通的变化, 即感应电流产生的磁通方向与原来磁通的方向相反。

如图 8-33 所示, 当高频磁场穿过金属板时, 在金属板上产生的感应电动势为金属板短路而产生涡流, 此涡流产生的反向磁场将抵消穿过金属板的原磁场, 高频磁场同时增强了金

属板旁的磁场，使磁力线在金属板旁绕行而过。这就是感应涡流产生的反磁场对原磁场的排斥作用。

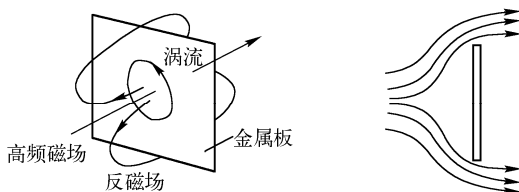


图 8-33 涡流效应及金属板对高频磁场的排斥

如果用良导体金属做成屏蔽盒，将线圈置于屏蔽盒内，如图 8-34（a）所示，则线圈所产生的磁场将被屏蔽盒的涡流反磁场排斥而被限制在屏蔽盒内；同样，外界磁场被屏蔽盒的涡流反磁场排斥而不能进入屏蔽盒内，如图 8-34（b）所示，从而达到磁场屏蔽的目的。

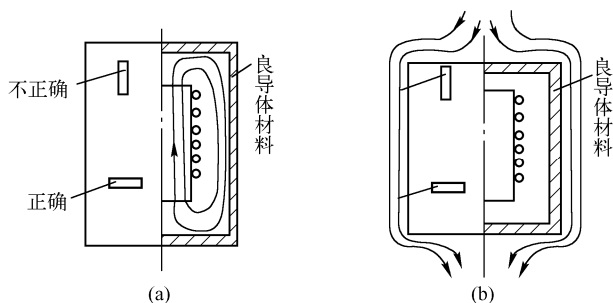


图 8-34 高频磁场的屏蔽

## 2. 磁屏蔽物的结构要点

（1）屏蔽盒的电阻越小，则产生的涡流越大，而且损耗也小。所以高频的屏蔽材料需要用良导体材料，常用铝、铜及铜镀银等。

（2）由于高频电流的集肤效应，涡流仅在屏蔽盒的表面薄层流过，而屏蔽层的内层表面被表面涡流所屏蔽。所以高频屏蔽盒无须做得很厚。对于常用铜、铝材料的屏蔽盒，当频率大于 1MHz 时，机械强度、结构及工艺上所要求的屏蔽盒的厚度，总比能获得可靠的电磁屏蔽时所需要的厚度大得多。因此高频屏蔽一般无须从屏蔽效果考虑屏蔽盒的厚度。实际中的屏蔽厚度一般取 0.2~0.8mm。

（3）屏蔽盒在垂直于涡流的方向上不应有开口或缝隙。图 8-35 为一高频线圈及其屏蔽方式，屏蔽的作用是防止线圈所产生的磁场对外造成干扰。其中，图（a）安装方式正确；图（b）安装方式不正确。

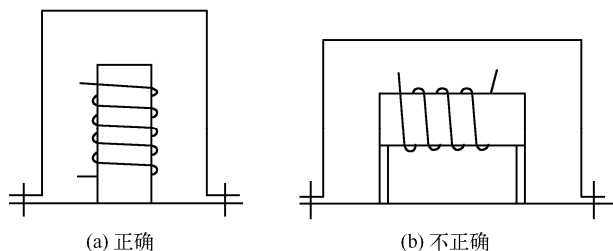


图 8-35 高频线圈屏蔽方式

(4) 磁场屏蔽的屏蔽盒是否接地不影响磁屏蔽效果。这一点与电场屏蔽不同, 电场屏蔽必须接地。但如果将金属导电材料做的屏蔽盒接地, 则它就同时具有电场屏蔽和高频磁场屏蔽的双重作用。所以实际中屏蔽体都应接地。

### 8.1.4 电磁场屏蔽

通常所说的屏蔽, 一般是指电磁场屏蔽。所谓电磁场屏蔽, 是指对电场和磁场同时加以屏蔽。

#### 8.1.4.1 屏蔽原理

电磁屏蔽是用屏蔽体阻止高频电磁场在空间传播的一种措施。电磁波在通过金属或对电磁波有衰减作用的阻挡层时, 会受到一定程度的衰减, 表示该阻挡层材料有屏蔽作用。材料的屏蔽效能与电磁波的自身特性及材料的性质有关。电磁屏蔽机理常用的分析方法有三种, 即借助电路理论, 即电磁感应原理, 通过涡流的屏蔽效应阐述电磁屏蔽的机理; 根据电磁场理论, 计算电磁波在不同传播媒质的分界面及媒质内部传输时产生的反射与衰减; 根据传输线理论, 行波在有耗非均匀传输线中会产生反射和损耗, 这与电磁波在通过金属时的现象相似, 用它计算屏蔽材料的反射与衰减, 比经典的电磁场理论更为简便。随着数值计算方法的不断完善, 有限元法及有限时域差分法已被用于复杂屏蔽体屏蔽效能的计算。

设有一厚度为  $t$  的无限大金属板 (见图 8-36), 放在感应源和受感器之间, 将空间分为两部分。若设定入射场在左部, 发出电磁波自左向右传播至板的左表面, 由于空气与金属是两种不同的介质, 在板的表面产生反射, 使一部分电磁波向左传播, 即反射波。另一部分电磁波射入金属内部, 向右继续传播, 经过金属板厚度  $t$  后, 由于金属对电磁波的吸收, 场强减弱。到达金属板在界面的电磁波, 又有一部分反射回金属内部向左传播; 另一部分穿过右界面向右继续传播。

电磁波在金属内的损耗表现为涡流损耗。感应源辐射出来的电磁波 (干扰磁场) 通过金属板时, 金属板产生感应涡流。涡流的反磁场将抵消一部分入射波的干扰磁场, 这可认为是被金属板吸收了一部分电磁能量, 使干扰场通过金属板时受到衰减, 从而产生屏蔽效果。实际上, 上述金属板内的电磁波反射、吸收过程, 并不是只进行一次就完成的。而是在金属板的两个界面之间往复多次直到耗尽。

因此, 电磁波经过金属板时, 通过反射、吸收, 场强逐渐减弱。金属板的屏蔽作用是由左界面的反射、金属中的吸收和右界面的反射三部分组成的。金属板总的电磁屏蔽效果  $S$  为吸收损耗的衰减  $A$ 、表面反射损耗的衰减  $R$  及金属板内部多次反射损耗的衰减  $B$  之和, 所有因子都以 dB 表示。

$$S = A + R + B \quad (8-7)$$

吸收损耗的计算公式如下:

$$A = 0.131 t \sqrt{\mu_r f \sigma_r} \quad (8-8)$$

式中  $t$  为屏蔽厚度 (cm);  $\mu_r$  为屏蔽材料的相对磁导率;  $\sigma_r$  为屏蔽材料的相对电导率;  $f$  为频率 (Hz)。

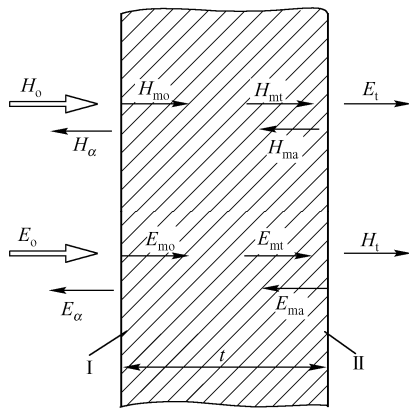


图 8-36 金属板内的电磁波反射和传播

表 8-7 用于屏蔽的金属特性

金 属	相对电导率 $\sigma_r$	相对磁导率 $\mu_r$
银	1.05	1
铜	1.00	1
铝	0.61	1
锌	0.29	1
黄铜	0.26	1
镍	0.20	1
铁	0.17	1 000
钢	0.10	1 000
化学镀镍	0.02	1

由于吸收主要由屏蔽厚度产生, 吸收因子对所有类型的电磁波都一样, 与近场还是远场无关。表 8-7 给出了一些常用屏蔽材料的相对电导率和磁导率。

反射损耗(近场)的大小取决于电磁波产生源的性质以及与波源的距离。对于杆状或直线形发射天线而言, 离波源越近波阻抗越高, 然后随着与波源距离的增加而下降, 但平面波阻抗则无变化。相反, 如果波源是一个小型线圈, 则此时将以磁场为主, 离波源越近波阻抗越低。波阻抗随着与波源距离的增加而增加, 但当距离超过波长的六分之一时, 波阻抗不再变化。

反射损耗随波阻与屏蔽阻抗的比率变化而变化, 因此它不仅取决于波的类型, 而且取决于屏蔽罩与波源之间的距离。这种情况适用于小型带屏蔽的设备。近场反射损耗可按下式计算, 其中,  $r$  为波源与屏蔽之间的距离。

$$R(\text{电})_{\text{dB}} = 321.8 - (20 \times \lg r) - (30 \times \lg f) - [10 \times \lg(\mu/\sigma)] \quad (8-9)$$

$$R(\text{磁})_{\text{dB}} = 14.6 + (20 \times \lg r) + (10 \times \lg f) + [10 \times \lg(\mu/\sigma)] \quad (8-10)$$

当吸收损耗衰减  $A > 6\text{dB}$  时, 多次反射损耗的衰减  $B$  可以忽略不计。仅当屏蔽层很薄或频率低于  $20\text{kHz}$  时,  $B$  才是重要的。实际应用中, 对电场和平面波,  $B$  值也往往忽略不计。

在设计磁屏蔽时, 特别是  $14\text{kHz}$  以下时, 除了吸收损耗外, 其他因素都可以忽略。同样, 在设计电场或平面波屏蔽时, 只考虑反射因子。

电磁波在金属内传播, 其场强随传播距离以指数方式衰减; 金属板的透入深度与金属的导电、导磁能力和所传播的电磁波的频率有关。金属的导电、导磁能力越好, 则它吸收电磁波的能力就越强; 电磁波的频率越高, 越易被金属吸收。实际上板厚  $t$  并不需要很厚, 经计算:

- (1) 当  $f > 1\text{MHz}$  时, 用  $0.5\text{mm}$  厚的任一种金属板做屏蔽物, 都可以使场强减弱至  $1/100$ 。
- (2) 当  $f > 10\text{MHz}$  时, 用  $0.1\text{mm}$  的铜箔制成的屏蔽物, 可以使场强减弱至  $1/100$ 。
- (3) 当  $f > 100\text{MHz}$  时, 可在绝缘材料上镀铜或银, 即可达到要求。

电磁波透过金属板时, 会在界面引起反射损耗, 反射使场强减弱。屏蔽体材料的导电性越好, 反射损耗就越大; 屏蔽体材料的导磁性越好, 反射损耗就越小。

#### 8.1.4.2 薄膜屏蔽

电磁屏蔽技术的发展, 使屏蔽体的形式不再局限于单层金属平板模式, 先后出现了薄膜屏蔽、多层金属屏蔽等多种屏蔽体形式。其中, 薄膜屏蔽是采用喷涂、真空沉积、电镀和粘贴等工艺技术, 在工程塑料和有机介质表面覆盖一层导电膜。

在电子工业高速发展的今天, 随着高分子材料的不断开发和塑料成型技术的不断发展, 工程塑料制件在电子设备中的应用日趋广泛。塑料制件具有重量轻、加工方便、成本低廉、造型设计灵活等优点。但由于工程塑料不像金属材料那样能吸收和反射电磁波, 而是很容易被电磁波所穿透, 对电磁波无屏蔽作用, 这样, 以工程塑料为壳体的电子设备在使用过程中有可能作为发射源造成空间电磁波污染, 或作为接收源受到外界电磁波的干扰。

为解决工程塑料抗电磁波辐射干扰和防信号泄漏的问题, 人们普遍采用塑料表面金属化的方法。而塑料表面金属化的方法很多。导电薄膜通常可分为金属化薄膜和导电涂料膜。金属化薄膜

主要有铜、铝、银、金等，它们的屏蔽效能与频率的关系曲线如图 8-37 所示，其厚度越大其屏蔽效能越高。薄膜屏蔽体仍然按照金属平板屏蔽理论分析计算屏蔽效能，但是由于导电层很薄，吸收损耗变得极其微小，主要靠反射损耗起屏蔽作用。

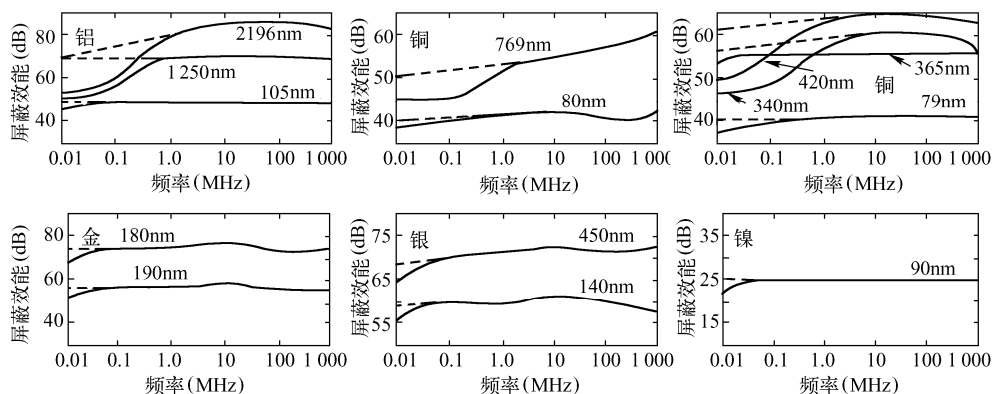


图 8-37 薄膜屏蔽层的屏蔽效能

电磁屏蔽导电涂料作为一种流体材料可以方便地喷涂或刷涂于各种形状的塑料制件表面，形成电磁导电层，从而达到屏蔽电磁波的目的。目前国内外电磁屏蔽导电涂料一般都以绝缘高聚物为主要的成膜物质，有银清漆涂料、银填充合成橡胶涂料、导电聚乙烯涂料、石墨粉导电涂料等。经混合研磨，然后喷涂于工程塑料表面，在一定温度下固化成膜，从而使塑料具有电磁屏蔽和导电性能。

导电薄膜技术还广泛应用在光学玻璃、有机玻璃基片上喷涂导电屏蔽层，这种既透光又能导电的玻璃称为导电玻璃，常用它来制作各种观察窗口的屏蔽材料。导电玻璃的屏蔽效能可以达到 80~100dB，它随频率升高而下降。导电玻璃的屏蔽效能与透光率还相互制约，越薄，其导电微粒越松散不连续，表阻就增大，屏蔽效能就较差；而透光率却因涂层薄而较高。相反，涂层越厚，表面电阻越小，屏蔽效能就增大，而透光率却较差。

#### 8.1.4.3 多层屏蔽

为了得到全频段屏蔽良好的特性，有时采用两层甚至三层屏蔽材料做成屏蔽体。如电导率高的金属材料，往往磁导率低，它们对高频电场有着很好的屏蔽，而在低频磁场中却不尽如人意。有些高磁导率的合金对低频磁场可以提供很好的屏蔽，但在高频电场中往往屏蔽效能很低，因此，将两种材料做成双层屏蔽体就可得到满意的屏蔽特性。

图 8-38 所示为多层隔离变压器原理图，变压器外面还有三层屏蔽密封体。 $S_1$  的作用是防止原边输入端的干扰通过原副边绕组的耦合电容而进入到副边电路中去； $S_2$  的作用是防止副边电路中的干扰通过耦合电容进入原边的电路中去。变压器外面的三层屏蔽层，其内层材料用铁，起磁屏蔽作用，中间层材料用铜，与铁芯相连并直接接地，这三层屏蔽层是为了防止外界电磁场对变压器形成干扰。

这种屏蔽型式的变压器信噪比很高，应用广泛，例如，应用于电话增音器的载波输入装置、低阻抗话筒和传声器输入装置以及应变仪、热电偶等仪表的输入装置等。

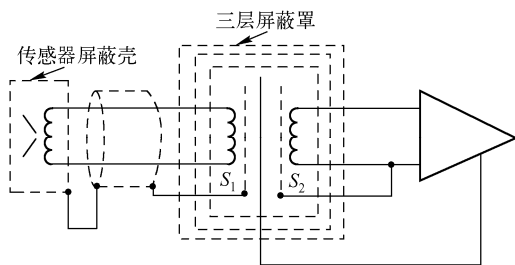


图 8-38 多层隔离变压器原理图

#### 8.1.4.4 电路屏蔽及其结构

为了防止外界电磁波对电子设备的电路形成干扰,以及设备内各电路之间的相互干扰,必须对电路进行屏蔽。

##### 1. 屏蔽单元的划分

现代电子设备能完成复杂的功能,这就导致在一个电子设备组成中包含有能实现各种各样功能的单元电路。电子设备的正常功能受到破坏的原因,不仅是由于信号在电气装置连线上产生失真,或在电气安装连线上出现交叉干扰,而且还来源于设备内不同单元的相互干扰,如调制干扰等。这些具有不同功能的单元电路之间需要屏蔽。即使在完成同一种功能的电路中,也应视具体情况考虑屏蔽问题。由此看来,在结构设计时合理地设置屏蔽单元是很重要的,应按具体情况参照经验来决定。下面介绍划分屏蔽单元的原则和成熟经验。

##### (1) 电路单元往往是屏蔽单元

不同功能的电路单元常会因相互间的杂散耦合而形成干扰,一般都应分别屏蔽。电路单元的工作频率越高,越应严格屏蔽。如对振荡器、混频器、放大器、滤波器等都应分别屏蔽,就是对不同频率的同性质电路(如滤波器),若安装得很靠近,也应分别屏蔽。

##### (2) 不同电平的课程应分别屏蔽

当不同电平的电路靠近时,往往高电平电路是干扰源,低电平电路是受感器。一般屏蔽干扰源比较有利,因为屏蔽一个干扰源(高电平电路)可以使很多受感器(低电平电路)免受干扰。但是当屏蔽高电平、大功率电路时,除非屏蔽盒体积很大,否则屏蔽效果就很差;在这种情况下,高、低电平的电路都应分别予以屏蔽。

##### (3) 有辐射场的电路和敏感电路应予屏蔽

具有辐射场的电路和电线(如振荡器、混频器、高频导线等)是干扰源,都应给予屏蔽。低频铁芯器件(如变压器)具有漏磁场,也应屏蔽。易受干扰的敏感电路如放大器等,一般应屏蔽,当增益较低时也可不屏蔽。增益较大的多级放大器,级与级之间也应屏蔽。

##### (4) 根据电路特性和性能要求决定是否屏蔽

电路是否需要屏蔽决定于电路本身的特性和对电路的性能要求。各种电路对外界干扰的反应各不相同,如果放大器对外界干扰信号很敏感,很小的干扰信号就会使输出变坏;而整流电路对外界干扰的反应就较小,故对易受干扰的电路必须屏蔽。此外,对电路的性能要求不同,其屏蔽要求也不同。

总之,在进行电子设备结构设计时,应根据设备的电性能要求,分析各个电路和元器件的特性、工作状态以及对干扰的敏感性等因素,权衡利弊,才能合理地划分屏蔽单元和确定是否需要屏蔽。

##### 2. 电路的屏蔽结构

##### (1) 屏蔽格

一个部件内各电路之间的屏蔽,可采用屏蔽格结构。用金属板将底板隔成若干个空间,每一空间称为一个屏蔽格。将需要屏蔽的电路,分别安装在各个屏蔽格中,然后用盖板将屏蔽格盖住,达到电路之间屏蔽的目的。

屏蔽格可用小块金属板铆接或焊接在底板上制成,也可直接铸造。屏蔽格的屏蔽效果与各板之间的联接形式和接触状态有关。若屏蔽要求不高可用铆接;若屏蔽要求较高则用焊接。盖板与隔板间应接触良好,最好加梳形簧片。

### (2) 屏蔽盒

采用屏蔽盒对电路单独屏蔽,其屏蔽效果比采用屏蔽格好;因为,用屏蔽盒单独屏蔽将没有屏蔽格中公共盖板与中间隔板接触不良的问题,故屏蔽效果较好。屏蔽盒以焊接结构为好,其次为铆接结构,要求高时可采用银焊并镀银。屏蔽体与盖之间应具有良好的电接触,如要求更高的屏蔽效果,可采用双层屏蔽盖。

### (3) 双层电磁屏蔽

在屏蔽要求很高、单层屏蔽已无法满足时,需采用双层屏蔽。也就是在一个屏蔽盒外面再套上一个稍大的屏蔽盒,两个屏蔽盒均用高电导率材料制成。设计时应注意以下问题:

① 通过内、外屏蔽盒的导线,在穿过金属板时需加穿心电容,并在内外屏蔽盒之间加滤波电路。

② 内、外屏蔽盒之间只能一点连接。由于内屏蔽盒有地电流,外屏蔽盒有感生涡流和其他电路的地电流,故采取一点连接可避免相互干扰。如果内、外盒大面积接触,则双层屏蔽就等于同厚度的单层屏蔽,失去了双层屏蔽的意义。内、外屏蔽盒的导体连接应采用焊接。

③ 在空间允许条件下,内、外屏蔽盒之间的距离越大,则屏蔽效果越好。为防止内、外屏蔽盒因变形或位移而短路,可在内、外屏蔽盒之间填以绝缘材料,如环氧树脂等。

### (4) 用敷铜箔绝缘板制成的屏蔽结构

当干扰场(波)的频率在1MHz以上时,用敷铜箔绝缘板制作屏蔽盒,具有较好的屏蔽效果。用裁制好的敷铜箔板经锡焊形成屏蔽框架,再锡焊在印制电路板的接地铜箔上(注意:在设计印制电路板时,就考虑好安装屏蔽框架的位置),加盖板后即成屏蔽盒。

用敷铜箔板制作屏蔽盒用于高频屏蔽效果显著;频率越高,屏蔽效果越好。与同尺寸金属屏蔽盒相比,敷铜箔板屏蔽盒重量轻,并节约钢材。当敷铜箔板屏蔽盒(格)与印制电路板做成一体时,可使印制电路板的刚度提高10倍以上。

#### 8.1.4.5 机壳箱体的屏蔽设计

各种独立封闭系统的壳体,大的如飞机的蒙皮、军舰的船体、战车的装甲,小到各种用电设备的机箱盒壳,它们绝大部分是用金属板材加工组合而成。由于在接缝处难免存在缝隙,有的还要开口,如通风散热窗孔、操作显示窗口、电源线和信号线的出入口;在大的飞机壳体上有发动机进气道口、驾驶舱窗口等,因此严格来说封闭系统的壳体并不是一个完整封闭的屏蔽体。各种不连续的结构都会造成电磁能量的泄漏,降低机壳和箱盒的屏蔽性能,例如,一个无限大平板金属屏蔽体在平面电磁波作用下的屏蔽效能为120dB,而实际机箱的屏蔽效能只有50dB左右,原因就在于那些不可避免的窗口和孔缝泄漏损害了屏蔽体的完整性。

一般机箱常见的孔缝结构可归纳为以下几种:

- (1) 接缝处的缝隙。
- (2) 通风散热孔洞。
- (3) 窗盖或活动盖体的链接构件。
- (4) 各种表头和数字或指针显示窗口。
- (5) 控制调节轴安装孔。
- (6) 指示灯座、熔丝座、电源开关、操作按键安装孔。
- (7) 电源线、信号线连接器安装孔。

机壳箱体的屏蔽设计就是分析计算各种孔缝开口对屏蔽效能的影响,以及根据屏蔽效能的要求,寻找改进结构提高屏蔽效能的方法。

### 1. 缝隙的屏蔽

影响屏蔽完整性的主要因素是屏蔽体上的接缝。为提高屏蔽体的屏蔽性能,就要求每一条接



图 8-39 缝隙的示意图

缝都应该是电磁密封的。实际由于接合表面不平、焊接质量不好、紧固件(如螺钉、铆钉)之间存在不密封的空隙等,都会在金属板的接合处留下一些细长的缝隙,只能在某些点处才接触得好些(如图 8-39 所示),这就构成了一个孔洞阵列。缝隙是造成屏蔽机箱屏蔽效能降级的主要原因之一。

#### (1) 缝隙处的阻抗

在实际工程中,常常用缝隙的阻抗来衡量缝隙的屏蔽效能。从缝隙的示意图中可以看出,缝隙的阻抗可以用电阻和电容并联来等效,因为接触上的点相当于一个电阻,没有接触的点相当于一个电容,整个缝隙就是许多电阻和电容的并联。低频时,电阻分量起主要作用;高频时,电容分量起主要作用。缝隙的阻抗越小,则电磁泄漏越小,屏蔽效能越高。

#### (2) 影响电阻成分的因素

影响缝隙处电阻成分的因素主要有:接触面积(接触点数)、接触面的材料(一般较软的材料接触电阻较小)、接触面的清洁程度、接触面上的压力(压力要足以使接触点穿透金属表面氧化层)、氧化腐蚀等。

#### (3) 影响电容成分的因素

根据电容器的原理,很容易知道:两个导体表面之间的距离越近,相对的面积越大,则电容越大。

#### (4) 永久性接缝的屏蔽

屏蔽体上的永久性接缝是指那些连接在一起之后不再分离的接缝。这种接缝一般采用焊接工艺,如熔焊和钎焊。图 8-40 列举了两金属板之间常见的几种接缝形式,其中沿接合面用连续焊接形式的接缝质量较好,具体实施用搭焊和对焊。搭焊又分为平搭焊和阶梯形搭焊,点焊均是搭焊接缝。用镀锌铁皮制成的屏蔽体常用翻边咬合式接缝,它可有效地代替焊接形成的接缝。为了使该接缝具有良好的导电性,咬合前应先清除接合面上的非导电物质,然后将两者咬合起来,用适当的压力使之成型,最后进行焊锡钎焊。

这种永久性接缝处的射频阻抗几乎与金属板本身的射频阻抗相等,从而保证了屏蔽体接合处电气的连续性。连续焊接缝的射频特性最好。若用点焊,焊点间距不宜超过 5cm。

#### (5) 非永久性接缝(可拆式接缝)的屏蔽效能

可拆式接缝的配合面一般用螺钉紧固。由于紧固螺钉的间距不便太小,加之配合表面的不平整、清洗不干净、有油污、焊接质量不好和薄板材料的翘曲变形,不可避免地会在接合面产生缝隙,使屏蔽效能下降。

屏蔽体的缝隙对入射电磁场的屏蔽作用由两部分组成,即一部分是由于缝隙开口处的波阻抗与自由空间波阻抗不匹配引起的反射损耗;另一部分是电磁波透入缝隙内传输过程中产生的传输损耗。为便于分析,以屏蔽金属板上的狭长缝为例,分析其屏蔽机理。图 8-41 所示为典型的缝隙模型,其中,缝长为  $l$ ,缝深为  $t$ 。若电磁波垂直入射穿过缝隙,它在缝隙的传输特性和自由空间的传输特性是不一样的。这是因为缝隙形状窄长而较深,当  $l < 5$  时,根据波导理论可以认为,在平面波作用下,缝隙中的波阻抗将大于自由空间波阻抗,在缝隙入口处波阻抗的突变而引起反射损耗。同时,电磁波在缝隙内传输时产生传输损耗。缝隙的反射损耗和传输损耗都消耗入射波能量,从而产生屏蔽作用。缝隙中的电磁传播过程既不同于金属整体内部传播,又不同于自由空间传播。因此它会造



成带有缝隙的金属屏蔽体的屏蔽效能下降。

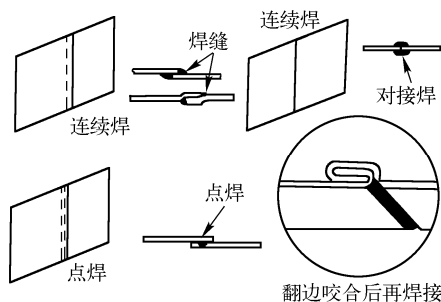


图 8-40 永久性接缝形式示意图

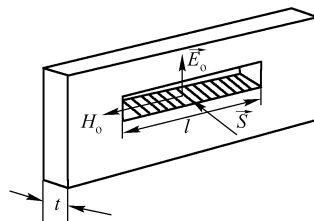


图 8-41 缝隙模型

通常缝隙中磁场泄漏要比电场泄漏严重得多。大多数情况下，主要分析磁场的传播损耗。透入深度是随着频率升高而降低的，因此，在金属板  $t$  一定时，被屏蔽的磁场频率越高，就越需要注意减小屏蔽体的缝隙。

#### （6）缝隙的屏蔽措施

根据以上缝隙的屏蔽原理分析，可以采取以下几种常见的方法来提高屏蔽效能。

① 增加缝隙深度。盒箱壳体中活动端面的接合处存在着最常见的屏蔽体的缝隙，两个接合面的搭接宽度（重叠量）是缝隙深度的主要决定因素。若连接如图 8-42 所示，不但增加接触面、便于紧固，而且还增加了缝隙深度，从而可提高总的屏蔽效能。在同样重叠量情况下，屏蔽效能随频率升高而下降。

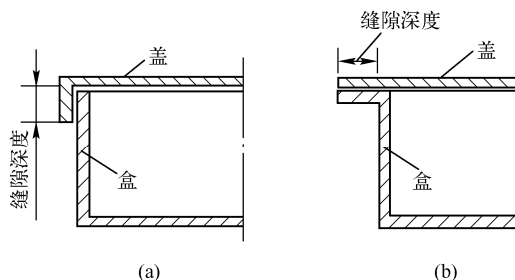


图 8-42 减少泄漏的结构措施

② 提高接合面的加工精度。提高接合面的加工精度是减少漏缝的有效方法，但采用精密加工方法会使成本骤增，通常采用铸造成型加工、端面磨削加工、电焊接加工等可以取得较好的效果。

③ 在接缝处涂上导电涂料和填隙料。图 8-43 给出了一些应用实例。供屏蔽体使用的导电涂料是用银粉与环氧树脂配制而成，它能牢固地黏附在金属、塑料、陶瓷等表面。涂在绝缘介质上时，若反复多涂几层则能进一步减小表面电阻率。这种导电涂料呈流体状，极易流入缝隙，填补被涂表面那些细微的不平整部位，改善金属与金属之间的电接触。已出现腐蚀迹象的接缝也能用这种涂料来改善电磁密封性能。使用时首先应把接缝配合表面上的润滑油、机油、油漆、灰尘、氧化层及其他不导电的薄层除去，为此可分别采取研磨、抛光等机械加工并以有机溶剂清洁其表面。

常用的导电涂料有导电胶、导电填胶和导电脂。导电胶是用环氧树脂和银粉混合配制，它能黏附在金属、塑料、陶瓷表面，用来粘接屏蔽箱体永久性接缝，减小缝隙电磁泄漏。导电胶在固

化前呈液体状,流动性好,容易渗透进入接合表面以填补缝隙。导电胶在常温下固化,固化后难以拆卸,成为永久连接。



图 8-43 导电填隙料的典型应用

导电填胶是一种不固化的导电胶,呈黏稠糊状,主要用来作各种屏蔽体的非永久接缝的密封填补,它可用专门注射器注入缝隙,也可用刮刀把它嵌入缝隙。

导电脂是一种银-硅黏液,它用来涂抹在屏蔽箱体的活动端面接触处和铰链轴承中,改善活动接触缝隙的电接触,减小电磁泄漏,提高屏蔽效能。

不论使用导电胶、导电填胶还是导电脂,甚至使用其他导电涂料,都必须对接缝表面进行清理,把各种影响导电性的油污、漆层和氧化层等污垢去除,然后才能加涂导电涂料。

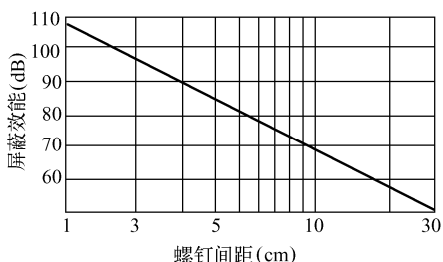


图 8-44 螺钉间距对屏蔽效能的影响

导电衬垫是一种夹在两层接合端面处的导电材料,它富有弹性,易于变形,使用了电磁密封衬垫后,缝隙中就没有较大的孔洞了,从而可以减小高频电磁波的泄漏。使用电磁密封衬垫的好处如下:

- a. 降低对加工精度的要求,允许接触面的平整度较低。
- b. 减少结合处的紧固螺钉,增加美观性和可维修性。
- c. 缝隙处不会产生高频泄漏。

虽然在许多场合电磁密封衬垫都能够极大地改善缝隙泄漏,但是如果两块金属之间的接触面是机械加工(如铣床加工),并且紧固螺钉的间距小于 3cm,则使用电磁密封后屏蔽效能不会有所改善,因为这种结构的接触阻抗已经很低了。

⑥ 屏蔽胶带。屏蔽胶带是在铜箔、铝箔或导电布上敷上导电胶构成的胶带,它的作用是将两块不同的金属部件导电连通起来,金属部件通过导电胶带中的金属颗粒与构成胶带的金属材料连接起来,从而构成一个完整的导体。屏蔽胶带用于屏蔽体孔缝泄漏补救、屏蔽电缆屏蔽层的端接等场合。

由于金属颗粒在正常条件下是埋在压敏胶中的,因此,导电胶是不导电的。使用时,要用力碾压,使金属颗粒穿透胶层,才能与金属部件导电接触。这是使用时必须注意的。

另外,在验证一种导电胶带的质量好坏时,也不能直接测量导电胶的导电性,而要用导电胶带将两块金属粘接起来,然后测量两块金属之间的导电性,电阻越小越好。

## 2. 通风孔洞的屏蔽

由于屏蔽箱体内部设备、系统及大功率元件散热和通风的需要,在屏蔽物上往往要开一定数

④ 调整紧固钉间距。在使用螺钉或铆钉紧固接合部位的许多缝隙中,每两个螺钉间距决定了缝隙可能的最大长度。从提高屏蔽效能的角度,要求螺钉间距越小越好,间距缝隙长度原则上应该远小于作用电磁波波长。图 8-44 表示了螺钉间距与屏蔽效能的关系。

⑤ 加导电衬垫。一般来说,用薄板材料以钣金加工制成的屏蔽盒箱,其接合面很难做到不留缝隙,因而只有通过缝隙中加装导电衬垫来提高屏蔽效能。导电

量的孔洞,这就造成电磁波从屏蔽物的孔洞处泄漏,降低屏蔽效果。

### (1) 影响通风孔屏蔽效能的结构因素

孔洞泄漏与多种因素有关,如场源的特性、离开场源的距离、电磁场的频率、孔洞面积和孔洞形状等。对于某一固定的场源,泄漏将随孔洞面积增加而增加。为此,应该在屏蔽物上少开孔,开小孔。在孔的面积相等时,正方形孔比圆孔泄漏大;长方形孔比正方形孔泄漏大。图 8-45 是屏蔽效能为 100dB 的密闭壳体上开一直径为  $d$  的圆孔时,远场屏蔽效能随  $d$  的增加而递减的关系。从图 8-45 可看出,当  $d=1\text{cm}$  时,屏蔽效能比无洞时降低约 20dB; 当  $d\approx 5\text{cm}$  时,屏蔽效能比未开孔时下降 60dB 左右。

### (2) 提高通风孔屏蔽效能的结构措施

为使屏蔽体既能达到预期的屏蔽效能,又确保通风良好,通风孔常采用如下处理措施:

① 覆盖金属丝网。当需要在屏蔽物上开设大型孔洞时,可在孔洞处覆盖金属网(一层或两层)。在口径较大的通风窗孔上覆盖金属丝网,实质上就是把大口径孔划分成多个小网孔,它能显著地提高屏蔽性能,这种方法结构简单、成本低、安装方便。

金属网网的屏蔽效能与网丝直径、网孔的疏密程度及网材的电导率有关,网孔越小、金属丝导电性越好,其屏蔽效果就越好。图 8-46 所示为四种不同规格的丝网做成半径为 1m 的球之后在近区磁场条件下的屏蔽效能。高于 100MHz 以后,屏蔽效能开始下降,表明它们不适宜用于数百兆以上的高频。其次,使用长久后,金属网交叉点的接触电阻因氧化而增加,导致屏蔽效能下降,安装后头几年的下降量约为 6dB/年。对网丝进行复合电镀处理可以改善交接处的接触电阻,特别是丝网目数高时,效果较为明显。

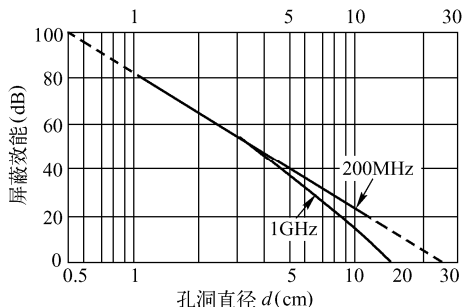


图 8-45 屏蔽效能与孔洞直径的关系

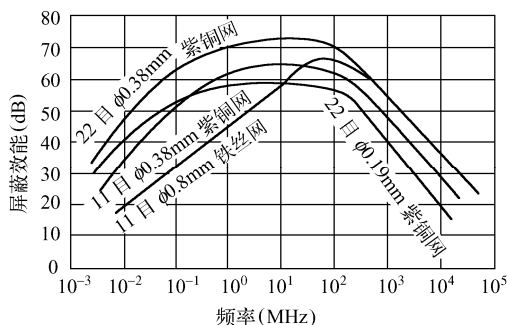


图 8-46 单层金属紫铜丝网的屏蔽效能

用金属薄板冲缝后拉制成的整体通风网板,其电性能优于同类金属丝的编织网板。金属丝网覆盖在通风孔上的结构有两种形式,如图 8-47 所示。一是把金属网覆盖在通风孔上后,周边经钎焊与屏蔽体壁连接。这种方法使金属网与屏蔽体之间有良好的电连接,但工艺复杂,且易破坏周围的保护镀层。较为常用的方法是用环形压圈和紧固螺钉把金属网安装在通风孔上。安装之前,应把配合表面的绝缘涂层、氧化层、油垢等不导电物质清除干净,并应安装足够数量的螺钉以获得连续的电连接。

② 用穿孔金属板作通风孔。当屏蔽体的屏蔽效能要求不高,并且对通风量的要求不高时,可以用穿孔金属板。穿孔金属板有两种结构形式:一是直接在屏蔽壁上打孔;二是单独预制成穿孔金属板,再安装到屏蔽体的通风孔洞上。穿孔金属板的优点是成本低,但屏蔽效能与通风量之间的矛盾突出。

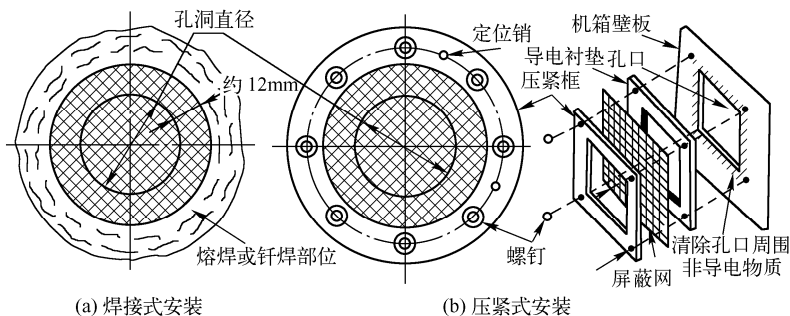


图 8-47 通风孔覆盖金属网的结构

③ 截止波导式通风窗。图 8-46 表明，金属丝网的屏蔽性能在频率高于 100MHz 后开始下降，所以在甚高频情况下金属丝网已不适用。穿孔金属板在甚高频屏蔽效能同样要下降，特别是孔眼尺寸并非远小于波长甚至接近于波长时更将引起严重泄漏。在甚高频，若既要有高的屏蔽效能，又要通风良好，可采用截止波导式通风窗。

波导衰减器是用铜等导电良好的材料做成空心圆形或矩形导管，在一定条件下导管具有引导电磁波在其中传输的功能。这种空心管称为波导管。根据波导理论，波导管在引导电磁波传输的过程中，当导管宽边  $W$ （或直径  $D$ ）恰好等于波长的一半时，电磁波产生极大衰减，这时的波导管就称为波导衰减器。与滤波器类似，波导管的频率特性也可以用截止频率  $f_c$  来描述，低于截止频率的电磁波不能通过波导管，高于截止频率的电磁波可以通过波导管。

截止波导式通风窗与金属丝网和穿孔金属板相比具有明显的优点：工作频段宽，即使在微波波段仍有较高的屏蔽效能；风压损失小；机械强度高，工作稳定可靠。它的缺点是体积（主要是厚度）大、成本高。当电磁波的频率低于波导截止频率时，它无法在波导中传输。

设计截止波导通风管时，首先应根据需要屏蔽的电磁场的最高频率  $f$  确定  $f_c$ 。为使波导有足够的衰减量，一般取  $f_c = 5 \sim 10f$ ；然后根据电子设备的结构和加工条件选择波导管的横截面形状，并由相应的  $f_c$  表达式计算横截面尺寸；最后按所要求的屏蔽效能计算截止波导管的长度  $l$ 。

从电子设备的实际通风散热要求考虑，为了获得足够的通风面积，可将很多根截止波导紧挨着排列构成一组截止波导式通风孔阵（蜂窝状通风窗），如图 8-48（a）所示。设计、加工完善的单层波导式通风孔窗在 10GHz 时的屏蔽效能可达 100dB 以上。为了提高屏蔽效能，还可采用双层互相交错叠置的蜂窝状板组成，如图 8-48（b）所示，利用波导孔错位处的界面反射进一步提高屏蔽效能。

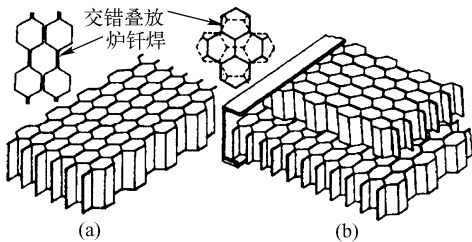


图 8-48 蜂窝状通风窗

随着工艺的改进和专业化生产，截止式波导通风窗的应用日趋广泛。不过，截止式波导通风窗对于低频磁场的屏蔽效能并不理想，100MHz 以下的屏蔽一般不推荐使用。使用截止波导板时，同样要注意与机箱基体之间的搭接，一般使用焊接或电磁密封衬垫连接。截止波导除在通风窗中得到广泛应用外，还被用于抑制转动轴和照明孔的电磁能量泄漏等场合。

### 3. 传动轴的屏蔽

穿过屏蔽盒而伸出的传动轴，可以用金属轴，也可用非金属轴。机箱内需要调控的元件（如大功率可变电容器或变压器等）常有传动轴伸出控制面板，如图 8-49（a）所示。这里轴与轴承的接触阻抗、轴与轴承的缝隙，以及调控轴本身共同构成了电磁能泄漏的途径。设  $A$  为带电或感应带电

的部分；B 为绝缘联轴节；C 为外伸轴；D 为与面板相连的轴承。电磁能泄漏的等效电路如图 8-49 (b) 所示。图中  $Z_{AC}$  为 A 到 C 之间的绝缘电阻及分布电容构成的阻抗； $Z_{CD}$  为 C 与 D 之间的接触阻抗。显然，增大  $Z_{AC}$  或减小  $Z_{CD}$  都可使泄漏减少。

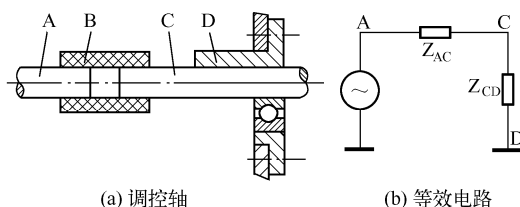


图 8-49 调控轴泄漏的分析

增大  $Z_{AC}$  的措施：选用介电常数小而绝缘性能好的材料制造联轴节；增大联轴节的轴向尺寸，使 A、C 之轴端间距得以增大。减小  $Z_{CD}$  的措施：提高轴与轴承、轴承与面板的配合精度；对于滚动轴承，除了在外侧加装防尘盖之外，还应对转动轴加辅助接地措施，如图 8-50 所示，在转动轴旁加接地梳形簧片；或如图 8-51 所示，在活动轴承内加环状接地簧片。

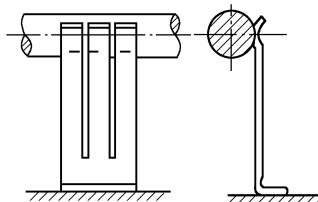


图 8-50 在转动轴旁加装接地簧片

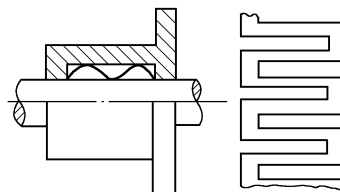


图 8-51 在轴承内加装接地簧片

在屏蔽要求较高的场合，抑制调控轴电磁能量泄漏的更有效措施是采用截止波导结构，如图 8-52 所示。当轴套长径比大于 3 时，就相当于一根圆波导。这里的传动轴必须用绝缘材料（陶瓷、聚四氟乙烯等介电材料）制成。

高性能屏蔽室出入口把手射频泄漏是制约屏蔽室整体屏蔽效能的关键因素之一，其设计要点可参照调控轴的处理措施。

#### 4. 面板上器件的屏蔽处理

##### (1) 很小的器件

如果器件的尺寸很小，可以采用直接在面板上开小孔的方法。只要面板上开的孔很小（小于 3mm），一般不会造成严重的电磁泄漏。但辐射源距离孔洞很近时，孔洞的泄漏是相当严重的。这时，可以采用图 8-53 所示的方法，将显示器件与电路隔离开，对电路采取完善的屏蔽，而将显示器件暴露出来。许多机箱采用这种方法，将显示器件安装在一块装饰用的塑料面板上。

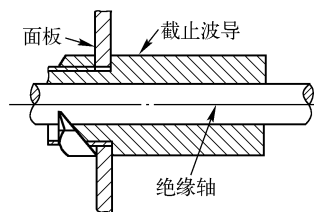


图 8-52 贯通调控轴采用截止波导

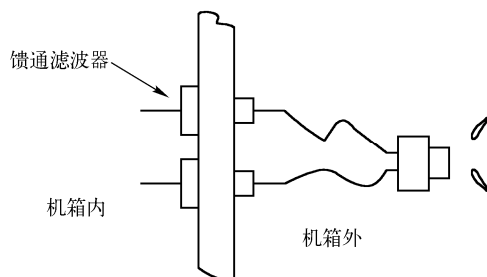


图 8-53 将显示器件与其他电路隔离开

## (2) 中等尺寸的器件

面板上还经常装有电源开关和各种电路性能的转换开关, 这些开关与面板的接合处总会有缝隙存在。为防止缝隙的泄漏, 常在开关与面板的接合面加入导电衬垫。图 8-54 为钮子开关的防泄漏安装结构。带有金属屏蔽外壳的插座在机箱板上的安装也照此处理。

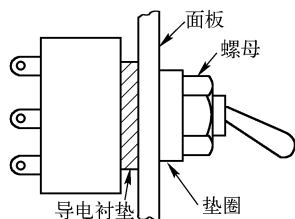


图 8-54 开关的防泄漏安装

## (3) 较大的显示器件

电子设备机箱的面板上通常装有指示表头及刻度盘等元件, 需要较大的窗口来显示, 这时可以有两种方法进行屏蔽。一种方法是在显示窗处使用透明屏蔽材料; 另一种方法是用隔离舱将显示器件与设备的其他电路隔离开, 使内部电路辐射的能量不会穿出机箱, 外部的干扰不会侵入到内部电路。

透明屏蔽材料有两种: 一种是金属网夹在两层玻璃之间构成的; 另一种是在玻璃或透明塑料膜上镀上一层很薄的导电层构成的。前一种材料的优点是屏蔽效能较高, 它对平面波的屏蔽效能达 70dB 以上, 但对低频磁场的屏蔽效能不大。后一种材料则正好相反, 电气透射率将随频率的上升而减小。

图 8-55 (a) 为面板上指示表头孔的附加屏蔽结构, 面板与附加屏蔽体之间还加入了导电衬垫, 以减小缝隙、改善电接触。穿过屏蔽体的表头引线由装在屏蔽体上的穿心电容引入, 使引线所感应的干扰信号旁路接地。图 8-55 (b) 表示了带有屏蔽壳体的电表在面板上的安装结构, 其特点是在电表的面上再覆盖一层导电玻璃, 以获得较完善的屏蔽。

导电玻璃的透光性及屏蔽效能都与其表面镀层的面电阻有关。图 8-56 为镀银导电玻璃在频率为 0.25~200MHz 的平面波场中测得的屏蔽效能。对同种导电材料而言, 电阻率越小, 屏蔽效能就越好, 但玻璃的透光性则越差。这类镀膜玻璃的屏蔽效能不易做高, 而且导电稳定性欠佳。

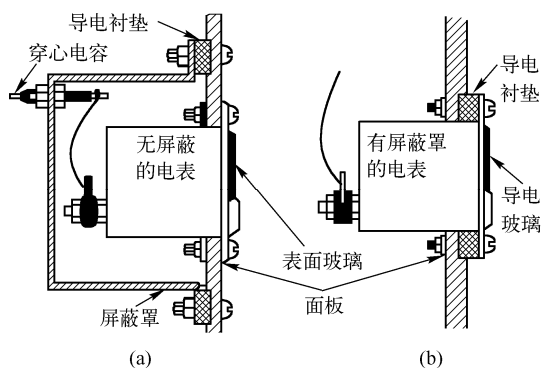


图 8-55 表头孔的防泄漏处理

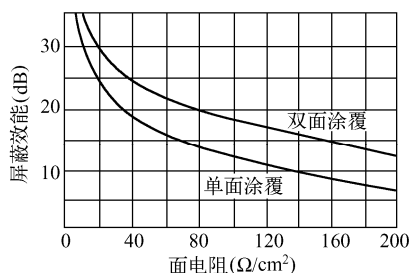


图 8-56 导电玻璃面电阻与屏蔽效能的关系

透明屏蔽材料的安装注意事项如下:

- ① 透明屏蔽材料与屏蔽体基体之间必须实现良好搭接, 减小缝隙的泄漏。
- ② 使用导电涂覆层屏蔽材料时, 导电层不能直接暴露在外面, 防止擦伤。
- ③ 使用金属丝网夹层的屏蔽材料时, 如果出现条纹导致视觉不适, 可以将金属网旋转  $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ , 会有所改善。

透明屏蔽窗方法简单, 视觉效果较差; 而隔离舱方法的视觉效果几乎不受影响, 不会破坏机

箱对磁场的屏蔽效能。但如果显示器件本身产生电磁辐射或对外界干扰敏感,这种方法不适合;当显示器件需要高频工作电流时也不适合。这时,可以将两种方法结合起来。

隔离舱安装注意事项:隔离舱与屏蔽体基体之间使用性能良好的电磁密封衬垫、所有导线经过馈通滤波器穿出。

### 5. 熔丝座的屏蔽

对于单个熔丝座可采用金属帽盖将其屏蔽,如一个设备的机箱上有多个熔丝座,则应把所有熔丝座集中在一起,用金属屏蔽罩把熔丝座全部屏蔽起来。为了减小缝隙泄漏,屏蔽罩与面板的接合处应加导电衬垫。

### 6. 电缆的屏蔽

电子设备的信号输入、输出接口及连接电缆是一个极其危险的电磁能量泄漏窗口,整机电磁发射电平的高低举足轻重。为了抑制泄漏,应采用屏蔽电缆及其相应的连接器。

电缆屏蔽层的种类有金属丝编织层、软导管、金属硬管或可缠绕的高磁导率带条。其中金属丝编织层是使用方便、重量轻、成本低的一种屏蔽层,得到广泛应用。金属编织层的屏蔽效能,目前尚无精确的计算公式,只能由生产单位提供或实测确定。编织层的屏蔽效能随编织密度上升而增加,随频率的升高而下降。金属丝编织电缆的结构如图 8-57 所示。为提高电缆屏蔽效能,可选用双层屏蔽电缆、三层屏蔽电缆或半刚性屏蔽电缆等。

电缆的磁屏蔽编织层可用高磁导率材料(Metglas 合金或国产的非晶态带材),也可用退火的合金箔带在电缆上连续缠绕而成。为满足屏蔽要求,往往需绕制多层,图 8-58 表示四层高磁导率箔带缠绕的屏蔽电线。绕制时相互紧贴的两层缠向应相反:将箔带沿电线轴向绕完第一层后,第二层就反向缠绕。此法绕制的屏蔽层间隙小,电缆仍保持柔性。

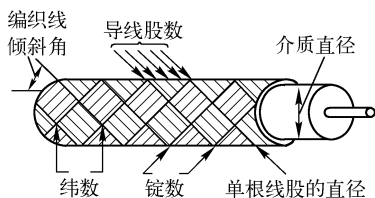


图 8-57 电缆屏蔽层的结构

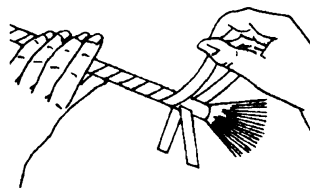


图 8-58 用磁性箔带绕制屏蔽层

电缆屏蔽层的屏蔽效能既与屏蔽层材料、编织密度等因素有关,也与电缆屏蔽层的接地方式及终端负载、入射信号源的阻抗等因素有关。电缆连接器的性能及电缆安装时的弯曲程度,也会影响电缆屏蔽效能。因为编织层的实际覆盖率是随着电缆的弯曲程度而变化的。当电缆弯曲时,靠近内侧的覆盖率增加,近外侧的覆盖率则显著减小。此外,电缆弯曲半径过小,可能因电缆芯线位置偏移而导致特性阻抗变化。同轴电缆在室内使用时最小弯曲半径应大于 5 倍电缆外径;室外使用时弯曲半径不小于 10 倍电缆外径。

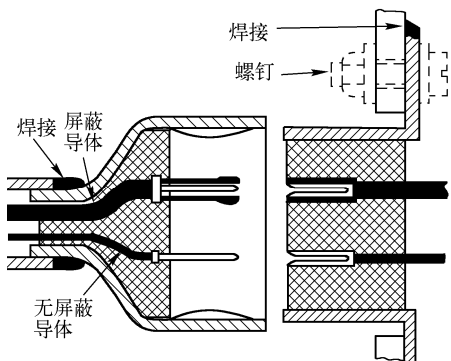
### 7. 电缆连接器的屏蔽

电缆连接器包括高频电缆插头座和低频电缆插头座。从高频同轴连接器的屏蔽性能来说,螺纹连接式比卡扣式好。

性能良好的连接器与插头配合以后,其屏蔽效能应等于甚至优于环路中使用的同等长度屏蔽电缆的屏蔽效能。电缆连接器的屏蔽效能除决定于连接器本身外,还有很重要的一点,即应该在电缆的周边把电缆屏蔽层和连接器完整地连接起来。N(L)型、BNC(Q)型等高频同轴连接器均已在其内部的电缆安装配件上给予保证,使得连接器外壳和被连接电缆的屏蔽层之间

实现良好的连接。当电子设备工作频率很高，上述常用高频同轴电线连接器已无法胜任时，可考虑采用平接头。此类连接器加工精密，有三重屏蔽，在 10GHz 时驻波比可达到 1.01，屏蔽效能大于 100dB。

多芯电缆连接器的结构如图 8-59 所示。它由多根电缆（屏蔽的或不屏蔽的）穿过同一连接器，



并保持每根屏蔽电缆单独屏蔽，每根电缆的屏蔽层应各自单独接地。连接器的屏蔽外壳应作可靠的接地处理。

屏蔽电缆连接器的使用应遵循下述三点：

(1) 连接器的结构应确保在各种规定的环境条件（振动、腐蚀、温度极限等）下工作时的屏蔽效能。在要求较高的场合，优选螺纹式连接器。

(2) 两连接器对接部分的连接器屏蔽层，在配对插针相互接触之前，必须已经真正接通；反之，应一直保持到配对插针分开以后再脱离。

(3) 连接器配合部分的插针（或插座）应有足够的电气绝缘，以保证在插针未插入插座之前，现场工作人员不会因偶然地碰到插针（或插座）而遭到电击。

图 8-59 多芯同轴连接器结构

#### 8.1.4.6 实际屏蔽体的屏蔽效能及期望值

由上述分析可见，工程中实际使用的屏蔽体存在着各种电磁泄漏途径，将导致屏蔽效能的减小。电磁场无论从屏蔽体的内部空间穿透到外面，或者从外面进入其内部空间都可以归结为两个途径（如图 8-60 所示），即经屏蔽体材料的穿透和电气上不连续处（孔洞、缝隙）的泄漏。由于电磁波在屏蔽壁中传播和在孔洞、缝隙中传播时不但速度不同，而且受到的衰减也不一样，因此形成了不同传播途径的电磁场幅度和相位的差异；这种差异还与屏蔽空间各考察点的坐标有关。一般情况下，这将造成十分复杂的场结构，使得对屏蔽效能的定量计算十分困难。

实际屏蔽体的屏蔽效能受到多种因素影响时，对屏蔽效能起制约作用的是电磁泄漏最大的那个因素（如木桶原理）。根据实心型屏蔽计算所得的屏蔽效能一般均很大，远大于影响屏蔽效能的其他诸因素。尽管实心型屏蔽材料自身导致的电磁泄漏与其他因素相比通常是很小的，但这并不能说实心型屏蔽理论没有实用价值。实心型屏蔽理论在指导屏蔽材料的选择和确定屏蔽方式等方面有其指导作用，是屏蔽设计的理论基础。

在屏蔽设计之前总体指标的分配至关重要。有 30dB 与 70dB 准则之说：一般而言，在同一环境中的一对设备，干扰电平与敏感度门限电平之差小于 30dB 时，设计阶段可不必专门进行屏蔽设计；若两者之差超过 70dB，单靠屏蔽很难保证两者兼容，即使能达到指标，设备成本将急剧增加。因为工程中应用的大部分结构辅助材料，例如，复合型功能材料、双层屏蔽电缆、射频同轴连接器、夹网屏蔽玻璃、穿孔金属板、各种导电衬垫，甚至包括与屏蔽措施配套使用的电源干扰抑制滤波器等，对干扰所提供的实际抑制效能大致都不超过 60~70dB。

较为可行的办法是在总体指标或方案配置上做出适当调整，把屏蔽效能的期望值定位在 30~60dB 之间；如图 8-61 所示，1MHz 以下的低频磁场屏蔽效能随频率的降低而降低；1GHz 以上的波长将与缝隙长度相比拟，期望值应适当降低。对于立式标准机柜，由于其自身结构尺寸的特点，在 230MHz 以上易出现结构电谐振（波导效应），屏蔽效能明显下降，例如降到 50dB 以下。



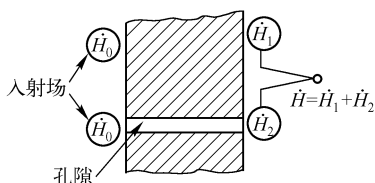


图 8-60 带有孔隙的屏蔽板

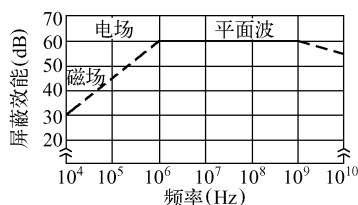


图 8-61 推荐的屏蔽设计期望值

屏蔽要求高于上述期望值时，最常用的措施是整体屏蔽之后，内部再加第二重屏蔽。

#### 8.1.4.7 电磁屏蔽设计步骤

(1) 根据设备和电路单元、部件的工作环境和防干扰要求，提出确保正常运行所必需的屏蔽效能值。对于诸如测量接收机、高灵敏测量仪器等敏感设备，则应根据敏感度值和工作环境的干扰场强确定其机箱的屏蔽效能。对一些大、中功率的信号发生器或发射机的功放分机，可根据这类设备的辐射发射极限值和其自身的辐射场强来确定屏蔽效能的要求。

(2) 按所需要的屏蔽效能值确定屏蔽的类型。对屏蔽要求不高的设备，为了减轻重量、降低成本，可采用导电塑料制成的机壳或一般塑料机壳上喷涂导电层构成薄膜屏蔽。若屏蔽要求较高，则可采用薄金属板制成的机壳。若要求有很高的屏蔽效能，则要采用双层屏蔽或多重屏蔽结构。

(3) 由屏蔽体的功能（机箱或设备内部的屏蔽）、允许的屏蔽空间确定屏蔽体的尺寸、形状和结构形式。

(4) 针对干扰场强的特性和所处的场区，根据实心型屏蔽理论合理选择屏蔽体的材料，并按屏蔽体的机械特性（刚度和强度）和屏蔽效能值确定屏蔽体的壁厚。一般屏蔽体均存在电磁能量的泄漏途径，按实心型屏蔽理论计算屏蔽层的厚度时，应留有余地。

(5) 进行屏蔽体的完善性设计，也就是要根据设备的具体要求和生产工艺条件选择相应的措施，以抑制屏蔽体上所有电气不连续处造成的电磁能泄漏。屏蔽体的完善性设计是屏蔽设计中工作量和难度最大的部分，其设计的质量将直接影响到屏蔽体的屏蔽效能，不应把希望全部寄托在导电衬垫上。

### 8.1.5 屏蔽材料的开发和应用

哪些材料能提供最好的屏蔽效能是一个相当复杂的问题。很明显不能只考虑导电性，其理由就在于电磁波不但有电场分量，还有磁场分量。要知道高磁导率和高电导率同样重要。钢是一种良导体，而磁导率的量级也令人满意。它是相对廉价并能提供很大机械强度的材料。应当注意，低频电磁波比高频电磁波有更高的磁场分量。因此，对于非常低的干扰频率，屏蔽材料的磁导率远比高频时更为重要。

用于屏蔽外场直接耦合的机壳或机柜的材料是很重要的。由于是高反射屏蔽，通常采用提供电场屏蔽的薄导电材料。对于 30MHz 以上更高的频率，通常应主要考虑电场分量，在后一种情况下，非铁磁性材料，诸如铝或铜，能提供更好的屏蔽，因为这种材料的表面阻抗很低。

#### 8.1.5.1 导电涂料

由于发泡塑料易成型，并具有价廉、重量轻、便于安装、抗腐蚀、外观好等优点，其应用日

益增加。如果能提供有效的 RFI/EMI 屏蔽,则用途将更广泛。通常的方法是,在塑料基底上增加一个导电涂层。就像将塑料机箱放入金属机箱一样。

用于导电涂层的主要材料有银、铜和镍。银是一种高导电性材料,但还应考虑价格是否合适。然而,当用作涂料填充物时,它具有 50~80dB 衰减或屏蔽效能,但还取决于频率。银常用于军用设备,特别是需要防护 EMP(电磁脉冲)的设备。

铜的导电性接近银,但价格低廉。然而,铜易于氧化而使屏蔽效能受到损失,在一般环境条件下,不单独使用。近来镍已成为主要的研制对象。它不同于铜或银那样的良导体,但由于它存在导磁性,能吸收较多的 EMI。它还具有抗腐蚀的性质,而且成本较低。锌在火焰喷涂中用作主要媒质,具有屏蔽和抗腐蚀性质,但它用作导电涂层并不多见,而且市场进展也较慢。由于石墨仅能提供 20dB 衰减,而且主要用于敏感集成电路的静电防护,所以一般也不用作导电涂层。

### 1. 导电漆

迄今为止,成功的导电漆都基于聚丙烯、聚氨酯、乙烯树脂或环氧树脂等衬底。导电漆都有适用期和储存期,后者为 6~12 个月。导电漆都有不同程度的胶粘性质,对塑料基底存在腐蚀作用,所以导电漆能穿透塑料并固定在孔缝中。所有基底表面应仔细清洁,清除油脂或其他污渍,轻度擦伤也将影响黏附力。

#### (1) 银漆

银漆能用在陶瓷或更一般的塑料基底上,甚至可用于木质表面上,它有良好的抗磨损特性和可焊接性。银乙烯基是典型的简单组合系统,它在环境温度中约 20min 便可干燥,再过 20min 或 30min,便可进行下一次涂敷,直到 20h 以后,达到最大的电导率。银乙烯基的干燥膜厚度为 0.025mm,每升银漆可提供理论覆盖面积为  $8.5\text{m}^2$ 。实际上,由于过喷,约 10%银漆被浪费。

银聚氨酯涂层,通常是两部分组成的系统,其重量的 55%左右为纯金属银薄片或球。对于所有导电漆,通常采用的喷枪的压力为 6~10 磅/平方英寸和 35~55 磅/平方英寸。压力设备中,空气搅拌器是防止银颗粒沉淀的重要设备。

#### (2) 镍漆

镍通常与聚丙烯组成镍漆,理想情况下以 ABS、聚苯乙烯、聚碳酸酯为衬底。对于聚丙烯成分,在 20℃条件下的干燥时间为 30min,若需第二次喷涂则还需进一步干燥 30min 后进行。经过 120h 后达到完全导电。通常,干燥薄膜厚度规定为 0.05mm,所以喷漆室内应设厚度精确测量设备;如果喷得太厚,则费用太高,喷得太薄,则达不到足够的屏蔽性能。

干燥膜中镍粉的重量至少占 80%,才能得到最佳屏蔽;金属颗粒远多于 84%时,将使胶粘性 and 衬底的机械性质变差。

#### (3) 铜漆

铜填充导电涂层由于腐蚀而得不到广泛使用。

#### (4) 底漆

导电漆的性质一般都与基底材料不相容,所以要用专门的底漆。底漆将与塑料基底胶粘在一起,而漆的化学连接本身将转化为层间或与底漆的连接。

#### (5) 导电环氧树脂

前面关于导电漆的讨论,主要集中在涂层的塑料基底上,但有时却将导电漆用于金属表面。通常,该体系是基于聚丙烯、聚氨酯、乙烯基等,当应用于金属时,它们并不显示出良好的胶粘性。解决的方法是采用黏稠环氧系列材料,它能搀入镍或银。

金属表面进行导电涂敷,可以改进它们的电化学腐蚀性质,特别是相应的导电衬垫与金属接触时。镍环氧漆通常由三个系列组成,即衬底、较薄和较硬三类。涂敷完毕后,能得到 0.025mm 厚的干燥膜和 40~50dB 的屏蔽效能。这种漆能提供极好的冲击阻尼和良好的胶粘性,特别是与低碳钢、铝、铬酸铝有很好的黏着力。

#### (6) 镍涂层填充物

镍可用于涂敷各种价廉的颗粒材料,它具有镍的表面性质,而同时具有基底材料的某些性质。镍涂敷的所有材料中,石墨是具有最大潜力的一种。它机械性能好,化学稳定,而且固有导电性,也较便宜,密度低。其结果是涂敷的颗粒具有比纯镍更低的密度,进一步降低了成本。实际上,涂敷于石墨上的镍的总量或市场上买得到的涂镍颗粒所具有的镍的重量约占总重量的 25%~85%。

涂敷颗粒的主要优点是它的总体密度较低。用镍涂敷的其他导电漆的填料包括铝、玻璃和某些氧化物、碳化物和铬钢碳化物。

#### (7) 银涂层填充物

如果射频只在导体的外表面传导,颗粒内部的银是无用的;这种集肤效应约在导体表面  $1\mu\text{m}$  左右,具有壁厚为  $1\mu\text{m}$  的空心银颗粒就可以了。去掉无用的银之后,既显著降低了成本,也大大减轻了重量。将空心银颗粒用作涂敷填充物,其颗粒的理想形状应使单位表面积包围的体积最大,这样,可用最少的银涂敷任一单位体积,因此,这个理想的形状就是球。球形颗粒还具有另外一些优点,即便于喷涂,对射频能量为各向同性。

银涂敷在直径约为  $50\mu\text{m}$  的空心或实心陶瓷或玻璃微球上,空心颗粒用于优先考虑重量的导电漆中。

### 2. 化学镀

化学镀覆均匀的固态金属涂层,将减小零件表面的微电池反应。塑料的化学镀处理是在非导电塑料基材上产生薄金属涂层。通常选用复合镀,即镀铜(高导电性)再镀镍(防锈)。化学镀铜本质上是纯铜镀覆,而化学镀镍可包含 3%~10%的磷。

在塑料镀的基本过程中,模压塑料机壳总是浸泡在一系列化学处理溶液中,由三个主要处理步骤组成,即预处理、催化处理和化学镀处理。化学镀的预处理包括溶解过程的改善、酸洗和中和,溶液能在塑料表面产生微观孔穴,为化学镀金属涂覆提供黏附点。

由于化学镀铜是一种纯金属涂层,而没有黏结剂、填充物、氧化物和吸附气体等电镀涂层所附有的物质,一个  $0.625\mu\text{m}$  的极薄的镀覆可以提供约 80dB 屏蔽效能。铜可以在很宽频率范围内提供 65~120dB 的屏蔽效能。

### 3. 火焰喷涂

在两条金属导线之间产生电弧,将金属汽化后,利用空气吹在塑料基体上。当熔融金属的粒子撞击塑料表面时,它们展平和冷却后,形成连续的金属薄膜。金属电弧喷涂,通常用来镀锌,比导电漆和箔屏蔽更有效。厚度为  $60\mu\text{m}$  时,具有 55~65dB 的屏蔽效能。值得注意的是,如果机壳内侧被设计得更容易进行电弧喷涂,例如,没有尖角、在肋之间有适当的空间,并消除裂缝深度,则将降低成本,并保证使用寿命。

这项技术的应用受到黏着性和温度这两个内部相关因素的限制。锌与塑料的连接纯粹是一种由金属粒子撞击所引起的机械连接。如果电弧枪离塑料部件太远,金属粒子就没有足够的能量保证适当的黏着性;然而,枪如果离塑料部件太近,金属冷却时的热耗散,将足以使塑料变形。

### 4. 真空金属化

真空金属化,是指将提纯的金属沉积在塑料部件上,其主要优点是美观和显著的屏蔽性质。

所用的金属为铝（最常用）、锌、铜、钢、镍和银。涂层为 0.05~10μm 厚，且相当均匀，不影响塑料的冲击强度，也不影响其内部公差。这种处理能提供涂层的最佳选择，能屏蔽某些产品的重要区域而堵塞穿孔。

尼龙、聚芳基化物、聚酯很适合进行这种处理，而丙烯晴-丁二烯-苯乙烯三元共聚物，聚苯乙烯和聚碳酸酯也能被金属化。然而，粘接性和耐久性却不如其他技术。许多材料，特别是聚芳基化物，需要在镀覆之前先做基础涂层。真空金属化小室的费用较贵，其尺寸大小将限制需要镀覆的部件的数量。而且保证平滑的金属涂层所用的夹具也将占用小室的空间。

当希望良好的装饰漆能在低频范围同时得到良好的屏蔽性能时，夹具的初始成本将很高，不锈钢的铜夹芯涂层是常用的组合，能给出上至 70dB 抗扰度，并具有抗腐蚀性。

8.1.5.2 导电填料

很多种类的导电填料给工程师们提供了增强电磁屏蔽完整性的通用方法。不论是单成分还是两种成分的树脂胶，树脂胶内的金属化填料均能在一对配件之间提供很好的电气连接。这一对配件虽然从机械上是固定在一起的，但它们之间还需要半弹性的防干扰密封。填料要设计成不完全固化的，这样材料就能随着匹配元件移动。这样还有一个特别的好处就是当设备进行维修或移动时，需要把机壳各部分拆卸下来，之后再重新组装时，容易把旧的填料刮去，重新加入新材料。

在导电填料的众多用途中，其典型的应用如下：屏蔽室或机壳上面板的 RFI/EMI 密封、屏蔽的地下导管系统、防潮接缝、修理损坏的屏蔽密封垫、对螺栓和螺丝孔进行密封、许多变型的紧固件系统和设备提供的密封。

这种导电材料不仅能用于两个表面上无氧化层、并经去脂处理、非常干净的金属面之间的密封，还能用于塑料面的表面涂层。

导电填料的使用方法，可以用传统的填隙枪或诸如小的注射器一类的配料设备，也可以用手工方法，如用刮刀或油灰刀。填料没有任何腐蚀性，在室温下使用，大多数填料不会固化。这种特性可以使填料方便地除去或维修。

导电聚合物模压元件能提供坚固的机壳，使设备受到冲击时得到防护，而且当受到磨损或物理损伤时，不致像喷涂涂层那样，会使 RFI/EMI 屏蔽受到损害。设备制造者也因导电涂层不必抛光而从降低成本中得到好处。有许多不同的材料被用作塑料中的导电填充物，包括铝粉和纤维、石墨、不锈钢、镍粉和涂银玻璃珠等。铝粉可使树脂基材的热传导增加，用来改进导热性，通常需要填充 30%~40%。而不锈钢纤维只需填充 5%，就可获得良好的导电性。

表 8-8 给出了两种填料的典型物理特性。与导电银填料相比，镍的价格较便宜，且具有不同的电特性。

表 8-8 典型填料的物理特性

导电填料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	体电阻率 (Ω/cm)	20℃时固化时间 (h)	屏蔽效能 (dB)	工作温度范围 (℃)	寿命 (月)
银	4.90	0.001	2	100	55~200	6
镍	2.50	0.05	2	55	55~200	6

8.1.5.3 导电胶与导电脂

(1) 导电黏合剂

填料仅需具有合适的弹性，能密封空隙即可；而黏合剂除了导电性以外，还要有足够的机械

结合强度,才能应用于固定导电衬垫、螺栓和螺钉孔、电溅射的光导膜片与金属化织物间的连接。在波导工程中,它们方便地用于将搭接部分连接在一起,以及将法兰盘固定在波导上。

除了银以外,另有一些如铜、石墨和镍等填料能提供足够的体电阻率特性。

环氧树脂的两种基本成分尽管在室温下要固化,但还是提供了数小时的适用期,并且固化后的体电阻率大约为  $0.001\Omega/\text{cm}$ 。当工作环境温度在  $-60\sim+175^{\circ}\text{C}$  之间时,固化材料很坚硬并具有大约  $100\text{kg}/\text{cm}$  的抗剪强度。环氧树脂最简单的配方是将 A 和 B 两部分按重量或体积等比例混合,这样可以避免混合误差的增大。导电表面必须是十分干净的,没有任何油脂、润滑剂和其他杂质。

硅树脂黏合剂的体电阻率有可能达到  $0.05\Omega/\text{cm}$ 。有时候在未混合的有用材料中放入塑料片将两种成分 A 和 B 分开。一旦取出塑料片,各种成分就能进行有效的混合。

有时需要改变形状,则可采用背胶金属箔,它主要用于塑料表面,以提供屏蔽。通常,柔软的箔或带是用铜或铝制成的,可以用于机壳的内表面。

## (2) 导电润滑脂

导电润滑脂的功能之一就是能在涂有润滑的配件之间提供很小的接触电阻,如开关。通常,以银硅树脂为主的导电润滑剂是一种电导率很高的材料。它不包含碳或石墨填充剂。在很多环境条件下,这种材料都能保持它的电特性和润滑特性。大多数导电润滑剂是黏滞软膏。能在高温或架空的表面上使用而不滴落或流动。它们还具有防潮性能和防腐蚀性能。

导电润滑脂用在配电站内的开关中或悬挂的绝缘子中心减小 RFI/EMI 噪声。它们也能减小开关滑动金属触片的击穿和避免把接点烧坏。这种导电润滑脂是很有用的,可在滑动的金属触片表面之间保持连续的低阻抗。

### 8.1.5.4 导电光学胶片

在有弹性的聚合胶片的基片(如聚酯软胶片、聚酰胺胺胶片或聚碳酸酯胶片)上,带电正离子被材料的强大负电压所吸引,打到材料上,从材料表面撞出可移动的原子。这些射出的高能原子被束缚在基片表面就形成了镀膜。这个过程除了可以用来制造导电光学胶片以外,还可以用于制造涂层织物、金属箔、金属网和各种不同的弹性聚合物。经过低温真空处理的涂层费用较低,性能好。任何金属、合金和各种化合物都可以采用真空技术来镀膜。镀膜金属的高能量使其具有极好的对基片的附着力,并且导电胶片的均匀性很好。

较薄的胶片通常必须带有刚性支持物,如玻璃或聚丙烯板,并使用压敏或可溶于水的黏合剂。高导电涂层,如透明导电的金或银镀层可被用于 RFI/EMI 屏蔽。这些镀层是非常稳定的,可作为耐磨反光胶片上的防反射涂层。这种涂层在与阴极射线管一起使用时,不会引起扰动图形。

当需要使用大面积的半透明屏蔽时,可以采用多层阴极真空喷镀膜。在很多情况下,这种多层金属镀膜比镀金层经济得多,并且屏蔽效能差不多。这种涂层的典型应用包括人能进得去的法接第笼的屏蔽以及建筑物和其他一些结构的窗屏蔽。这种涂层在应用中的另一个好处是可作为太阳能可控涂层。RFI/EMI 屏蔽减少了建筑向外的 RFI/EMI 辐射,同时也降低了进入建筑物内部的辐射。阴极真空喷镀胶片的 RFI/EMI 屏蔽主要是对波的反射作用而不是吸收。这是因为胶片镀层具有很高的导电性。

胶片的安装方式不同,屏蔽效能也有所不同。如果镀层与外壳其余部分电气连接很好,那么这时屏蔽效能最佳。如果电镀胶片与外壳间存在不导电空隙时,这种空隙的作用会就类似于缝隙天线而导致辐射。电镀光学胶片应通过使用导电弹性填料、导电胶带或加载导电金属的黏合剂接地。

当电镀胶片用于建筑物中的 RFI/EMI 屏蔽时,应考虑以下几点:

- (1) 如果建筑物的其他部分在设计和建造时没有考虑 RFI/EMI 屏蔽，那么电镀胶片的屏蔽效能要严重打折。
- (2) 要避免胶片与窗结构之间的空隙，沿电镀胶片一周应通过框架接地。
- (3) 应对整个建筑物进行测试，以保证获得足够的屏蔽效能。

8.1.5.5 电磁密封衬垫

机壳、机柜或机箱材料，无论是塑料喷涂导电漆的，还是全金属的，在其上都有密封要求。在接头和缝隙处，导电衬垫是补救屏蔽裙带性被破坏的方法之一，这是对 RFI/EMI 屏蔽的非永久性的措施，例如门的密封、面板与机壳的密封，以及其他设备壳体间的密封。

1. 常用电磁密封衬垫的分类

根据所用材料的机械弹性、导电能力以及结构形式的不同，常用的导电衬垫可分为以下几种：

(1) 编织丝网衬垫

编织丝网衬垫是最普通、最经济的衬垫。它们由许多互相扣住的环状弹性丝组成，兼有内聚力和适应性较好的弹性，过量压缩时不易损坏、接触面大，它的弹性结构满足长接缝的不均匀性，丝网的微微磨损可以破坏氧化层，使表面间接触更好。机械硬度是重要的因素，丝网衬垫抗金属表面压力，其压力是集中在金属丝网的接触区。当丝网和金属表面的硬度相近，并在氧化膜上有大的压力出现时，氧化膜被破坏，重建了良好的电接触。低频时的屏蔽效能较高，高频时屏蔽效能较低。一般用在 1GHz 以下的场合。但不能被用在镁合金构件的金属配合表面上。

衬垫可以减小接缝（金属机箱两部分之间的接缝）处的泄漏，是由于提供了两部分之间连续的、低阻路径。只要很好地装填衬垫，且接触面干净，低阻是能够实现的。在衬垫和两个导电表面之间，不应有涂漆层、黏合剂、润滑剂或其他绝缘物。为了改善电接触，金属机箱的配合表面可以涂些镍环氧树脂涂料。

用作编织丝网的材料是蒙乃尔合金、铜、镀锡铜、镀银铜、铝或不锈钢，也可使用镀锡、包铜的钢线。市售的金属丝网可以用来制作衬垫，其线径为 0.05~0.152mm，最常用的直径为 0.112mm，而用铝线来编织时，线径要大些。某些不常用的材料是金、钼、铬、镍铁合金、纯铁、铂、镍、银和镍铁高导磁合金。

表 8-9 所示是一些较常用的材料，这些材料中任何两个金属之间得出的电压，是表中材料电压之间的电位差。从耐腐蚀的观点看，理想的情况是，衬垫和接触表面都用相同的金属或合金制作，但这是不可能的，特别是那些金属丝硬度比配合面更硬的地方。在理论上，如果在大气中或盐雾条件下，接触的金属电位不大于 0.3V，如果用于室内，则为 0.5V，但要考虑凝露。

表 8-9 相对浸润在海水中氯化亚汞电极的电位表

材 料	电位差 (V)	材 料	电位差 (V)
压铸锌合金	-1.10	铁和钢铬含量高	-0.35
镀锌钢	-1.05	镀锡钢	-0.45
镀镉钢	-0.80	铜和它的合金	-0.25
铝	-0.75	蒙乃尔合金	-0.25
硬铝	-0.60	银	0
铁和钢	-0.70	金	+0.15
铁和钢 12%铬	-0.45	铂	+0.15

编织丝网衬垫的基本家族可分为全编织丝网衬垫和橡胶芯编织丝网衬垫，包括需要环境密封

的衬垫和带边的衬垫等。

① 全金属编织网衬垫。这是一种弹性衬垫，它可以理想地用于 RFI/EMI 屏蔽机箱和屏蔽室门；通常其横截面包括矩形、圆形以及带边的圆形（或“P”型）等。超软铍铜编织网衬垫（空心）如图 8-62 所示，当压缩为 75% 时，形状 100% 恢复；不吸收潮气。

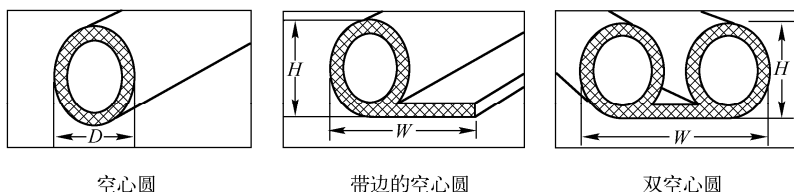


图 8-62 空心编织网衬垫

全金属编织网衬垫常用的金属材料为蒙乃尔合金、镀锡钢芯钢丝等，具有很高的屏蔽效能。安装方法如图 8-63 所示。

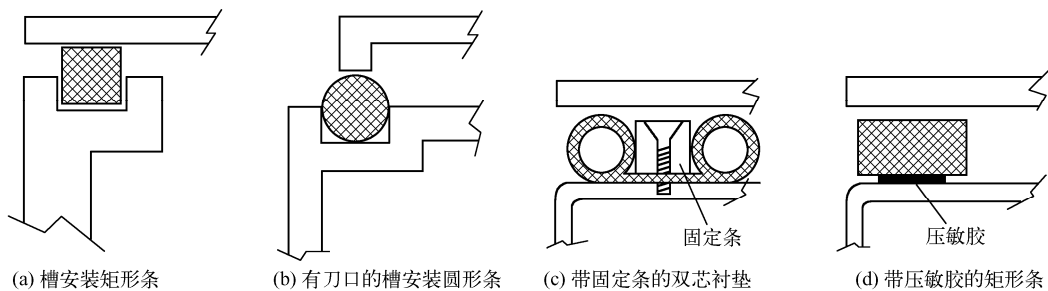


图 8-63 全编织网衬垫安装方法

② 橡胶芯编织网衬垫。这是一种弹性非常好的衬垫材料，金属编织网的材料和橡胶芯的材料可选。在这种结构中，编织丝网套在一个硅橡胶管上，提供一种高弹性、全天候的 RFI/EMI 衬垫。橡胶芯编织丝网衬垫将全编织丝网（弹性和导电性）的特性和硅橡胶的特性结合在一起，对于金属机壳和铸造的或机械的表面都是理想的衬垫材料。为了改进 RFI/EMI 屏蔽，可以增加一层编织丝网。这些衬垫能用与全金属衬垫相同的方法固定在给定位置上。硅橡胶管可提供抗灰尘、雨和空气的密封。但在高频及腐蚀环境中性能欠佳。

## (2) 软金属

使用硬度较低和易于塑性变形的金属薄片，如铜、铝等作为导电衬垫，使其在一定的紧固压力下产生形变而填满缝隙。虽弹性差，但价格便宜。

## (3) 指形簧片

用具有弹性的铍青铜、磷青铜或锡磷青铜等制成指形簧片，形变量大，装配后簧片变形而使接触表面间保持一定的接触压力，它通常用在接触面滑动接触的场合，如屏蔽室门及经常开启的屏蔽体盖，高频、低频时的屏蔽效能都较高。但在冲击、振动环境中电接触性能可能有潜在的不稳定因素；且价格较高。

指型簧片可以弯曲到不同程度来适应两个相对的接触面间极大的不平整性。但如果簧片弯曲过大，超出了它的弹性限度，那么就很难再恢复它的初始形状了。铍铜以屈服点高，拉伸强度大和弹性好而著称，并且还有高电导率、高疲劳强度和良好的抗腐蚀性能等优点。铍铜材料没有磁性，并有极佳的温度特性，见表 8-10。

表 8-10  镀青铜的特性

物 理 特 性	值	物 理 特 性	值
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	8.4	拉伸强度 (N/mm <sup>2</sup> )	1 200~1 450
熔点 (℃)	900	10 <sup>8</sup> 次弯曲挠度 (N/mm <sup>2</sup> )	±250~290
20~200℃时膨胀系数	17×10 <sup>-6</sup>	弹性模量 (N/mm <sup>2</sup> )	135 000
热导率 (W/m℃)	0.27	扭转系数 (N/mm <sup>2</sup> )	47 000
维氏硬度值, (HRC)	350~430	弹性拉伸极限 (N/mm <sup>2</sup> )	820~930

加工好的镀铜簧片表面可以是明亮的未处理的,也可选择镀锌、镍、银、金等金属或铬酸金属盐。

(4) 螺旋管衬垫

由镀铜或不锈钢带材卷成的螺旋管衬垫可以提供极佳的屏蔽性能(是所有电磁密封衬垫中屏蔽效能最高的),屏蔽效果一般在 80dB 以上。它具有较低的接触阻抗,其边缘的镀层可以为衬垫提供优良的防腐蚀性能,适量的压缩可以保证设备终生的优良接触。这种衬垫价格低,受到过量压缩时,容易损坏。

(5) 导电橡胶

导电橡胶是在硅橡胶中掺入铜粉、铝粉、银粉、镀银铜粉、镀银铝粉、镀银玻璃粉等制成的。它既有银的导电性又有橡胶的弹性,可兼有压力密封和电磁密封的功能,但安装时必须施加较大的压力才能达到预期的效果。从结构上分,有条材和板材两种,条形材又分为空心 and 实心两种;板材则有不同的厚度。其屏蔽性能:低频时的屏蔽效能较低,而高频时屏蔽效能较高。

通常,小截面衬垫用硅橡胶类,放在沟槽内,固定较容易,配合法兰较小。与大多数编织丝网相比,还可提供环境密封。衬垫的倒角较容易,衬垫加工方便,衬垫在现场更换较容易。需要对衬垫施加的压力小、变形较小,可延长使用寿命。U 型槽和 H 型剖面用于薄片型的机壳;两种截面沿金属条安装。挤压成型的衬垫安装常用于槽或沟中。这些衬垫既适用于方舱的压铸件,也适用于涂导电塑料的铸件。

硅橡胶的主要缺点是较硬、价格较贵,由于表面较软,有时不能刺透金属表面的氧化层,导致屏蔽效能很低。导电橡胶在铝或镁的配合表面使用时,会产生强烈的电化学腐蚀作用,所以用铝、镁材料制成的屏蔽体不宜采用导电橡胶作衬垫。

衬垫截面可以剪裁和切片成型。其切片成型方式不降低防干扰或环境密封性能,成本低,可以加垫加压粘接。片状的强度与衬垫材料一样,且有弹性。

(6) 导电布衬垫

导电布衬垫由导电布包裹上发泡橡胶芯构成,一般为矩形,带有背胶,安装非常方便,价格低,高、低频的屏蔽效能均较高,柔软,过量压缩时不易损坏,具有一定的环境密封作用,但频繁摩擦会损坏导电表层。

2. 常用电磁密封衬垫的比较

表 8-11 所示为全金属或全编织丝网衬垫的典型性能数据。

表 8-11  编织丝网衬垫典型性能数据

类 型	全金属	全金属带液体或空气密封	金属外壳海棉橡胶芯	金属外壳硅质管芯
温度范围 (℃)	200	-20~+100	-20~+100	-60~+200
环境密封	无	有	无	无



续表

类 型		全金属	全金属带液体或空气密封	金属外壳海棉橡胶芯	金属外壳硅质管芯
屏蔽效能 (dB)	H 场, 200kHz	60~80	60~80	60~80	60~80
	E 场, 100MHz	70~80	70~80	80~100	80~100
	E 场, 200MHz	80~100	60~80	60~80	60~80
	E 场, 2GHz	60~80	60~80	60~80	60~80
	E 场, 10GHz	40~60	40~60	40~60	40~60

比较电磁密封衬垫的性能通常从屏蔽效能、弹性、压缩永久形变、有无环境密封性、价格等几个方面进行比较。常用衬垫的比较如表 8-12 所示。

表 8-12 各种电磁密封衬垫的特点

衬垫种类	屏蔽效能	弹性	永久形变	环境密封	价格	优点
不锈钢螺旋管	高	好	小	无	低	价低
镀锡、铍、铜螺旋管	很高	好	小	无	中	屏蔽效能高
多重密封螺旋管	高	好	小	有	较高	有环境密封、耐久
指形簧片	高	好	小	无	高	压缩最大、允许切向滑动接触
空心金属网套	低频高, 高频中等	好	较小	无	中	需要的压力小
橡胶芯金属网套	低频高, 高频中等	好	小	无	低	价低
传统导电橡胶	低频低, 高频高	差	大	有	高	有环境密封、高频屏蔽好
双重导电橡胶	低频低, 高频高	好	小	有	低	有环境密封、高频屏蔽好、价低
定向金属丝导电橡胶	低频高, 高频低	好	小	有	低	有环境密封、价低

### 3. 电磁密封衬垫的选用

同时具有导电性和弹性的材料一般都可以作为电磁密封衬垫使用。因此, 市场上可以见到很多种类的电磁密封衬垫。这些电磁密封衬垫各有特色, 适合于不同的应用场合。设计者要熟悉各种电磁密封衬垫的特点, 在设计中灵活选用, 达到满足产品性能要求、提高产品可靠性、降低产品成本的目的。选择电磁密封衬垫时需要考虑以下几个因素。

#### (1) 屏蔽效能

根据需要抑制的干扰频谱确定整体屏蔽效能, 电磁密封衬垫要满足整体屏蔽的要求。不同种类的衬垫, 在不同频率处的屏蔽效能是不同的。

#### (2) 环境适应性

电磁密封衬垫之所以有这么多种类, 一个主要原因是要满足不同环境的要求, 使用环境对衬垫的性能和寿命有很大影响。导电衬垫中的弹性材料在屏蔽体的工作温度下不产生软化或塑性变形, 并确保使用期内不老化。它还应该耐高低温变化, 在工作温度范围内不致发生老化。

电化学腐蚀问题是设计屏蔽机箱时必须考虑的问题之一。在潮湿环境中, 会生长霉菌; 霉菌会放出酸性物质, 从而导致电化学腐蚀。因此, 在电磁密封衬垫与屏蔽体基体接触的表面上容易发生电化学腐蚀。发生在衬垫与屏蔽体基体之间的电化学腐蚀会造成下面两个后果:

① 降低屏蔽效能。电化学腐蚀的结果是降低了接触面的导电性, 甚至导致接触面完全断开, 这会造成机箱的屏蔽效能降低。

② 锈螺钉效应。电化学反应产生的化合物是非线性的半导体物质。这会产生信号混频, 结果是产生了新的干扰频率。

电化学腐蚀的速度与环境因素关系很大。在湿热、盐雾环境中腐蚀发展得很快, 而在干燥环

境中，腐蚀发展得较慢。导电衬垫的导电材料应是耐腐蚀的，而且在电化性能上要与屏蔽体的两配合表面材料兼容，不与接触材料发生电化学腐蚀。当腐蚀不能完全避免时，要确保衬垫材料更换的便捷。

振动是造成车载设备衬垫结合处被腐蚀、进而造成屏蔽失效的主要原因。因为振动导致衬垫与屏蔽体之间产生摩擦，即产生细小金属粉粒，这种金属粉粒即使在较好的环境中也容易腐蚀。

### (3) 结构要求

应有足够的厚度，并易于变形，以补偿缝隙在螺栓压紧时所出现的不均匀性。电磁密封衬垫只有受到一定压力时才能起作用。在压力的作用下，衬垫发生形变，形变量与衬垫上所受的压力成正比。大部分衬垫要形变 30%~40% 才能具有较好的屏蔽效果。

在衬垫上有过压存在时，将发生永久性形变。设计师把衬垫的使用分成三种主要情况：

- ① 永久性闭合。压缩形变是不重要的，因为衬垫不要求移去。
- ② 有规律的开启与闭合。相同的和重复的开启与闭合，此时压缩形变不十分重要。曲型例子是对称的盖板和带合页的门。
- ③ 可更换的。衬垫放置在不同位置上，每次都得更更换，例如波导中的圆形衬垫。

### (4) 电气稳定性

电磁密封衬垫是通过在金属之间提供低阻抗的导电通路来实现屏蔽目的的，因此，其电气稳定性对于保持屏蔽体的屏蔽效能十分重要。导电衬垫的导电材料应有高的电导率，以保证在缝隙压紧时屏蔽体接缝处的射频阻抗极小。在振动条件下仍然要保持电接触的稳定性和稳定性。

### (5) 安装成本

电磁密封衬垫的安装方法是决定屏蔽成本的一个主要因素。在考虑衬垫成本时，要综合考虑衬垫本身的成本、安装工时成本、加工成本等因素。

## 4. 电磁密封衬垫使用的注意事项

电磁密封衬垫的使用方法对屏蔽体的屏蔽效能影响很大。在使用时，要注意以下几点：

(1) 在所有种类的电磁密封衬垫中，指形簧片允许滑动接触，其他种类的衬垫绝不允许滑动接触，否则会造成衬垫的损坏。指形簧片衬垫安装方式如图 8-64 所示。安装簧片时，要注意簧片的方向，使滑动所施加的压缩力能够使簧片自由伸展。

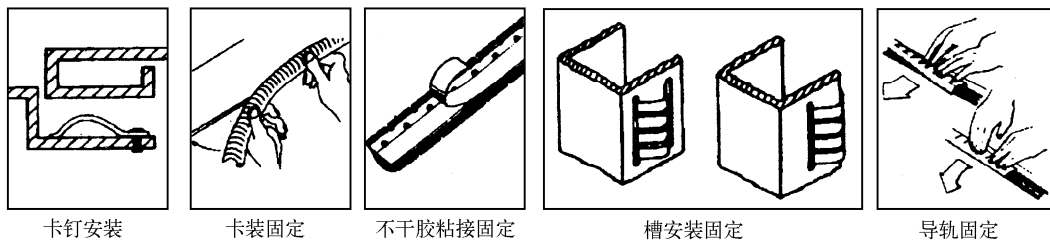


图 8-64 指形簧片衬垫安装方式

镀铜指簧片有多种标准安装工艺可供选用，如卡装、背胶安装等，部件还可用银焊或软焊技术安装。

- ① 卡钉安装方式。卡钉可以是塑料或金属的。
- ② 卡装固定方式。簧片自带卡装结构，便于安装固定。较恶劣的环境下（温度过高或过低、机械力过大等），可用卡装结构。
- ③ 不干胶粘接固定方式。在安装空间受限的情况下，背胶安装系统方便金属机箱和屏蔽壳

体接触。背胶在 $-55\sim+230^{\circ}\text{C}$ 之间能够提供足够的粘接强度。加上衬垫的几何形状设计,在完全压缩时,粘接强度更高。簧片自带不干胶,该不干胶专用粘贴金属机箱,具有很强的粘接能力。使用时注意以下几点:

- a. 将安装表面打磨干净,除去油脂和氧化膜。粘接表面必须清洁、干燥。
- b. 撕去保护胶纸。
- c. 正确选择簧片压力位置,位置选定后,要用力压紧避免反复揭贴,以免影响不干胶粘力或损坏簧片。

- d. 粘接后的簧片,要保持24h粘接固化时间(参考簧片厂家说明),以获得最大粘力。

④ 安装槽固定方式。槽式固定簧片可安装在2.99mm宽槽内,簧片在槽内可自由双向运动。

⑤ 焊接方式。用传统熔焊方式,将簧片焊接固定。

⑥ 导轨固定方式。簧片自带导轨附件,先将导轨安装固定,然后按图8-64方法,将簧片一边卡入后,再将另一边压入导轨另一边缘。

(2) 所有种类的衬垫材料受到过量压缩都会发生不可恢复的损坏,因此在使用时要设置限压结构,保证一定的压缩量。

(3) 除了导电橡胶衬垫以外,当衬垫与屏蔽体基体之间的电气接触良好时,衬垫的屏蔽效能与压缩量没有正向关系,增加压缩量并不能提高屏蔽效能。导电橡胶的屏蔽效能则会随着压缩量的增加而增加,这与导电橡胶中的导电颗粒密度加大有关。

(4) 与衬垫接触的金属板要有足够的刚度,否则在衬垫的弹力作用下会发生变形,产生新的不连续点,导致射频泄漏。对于正面压缩的结构,适当的紧固螺钉间距可以防止面板变形。

(5) 尺寸允许时,尽量使用较厚的衬垫,这样可以允许金属结构件具有更大的加工误差,从而降低加工成本。另外,较厚的衬垫一般更柔软一些,对金属板的钢性要求较小(从而避免了由于结构件刚性不够导致变形而造成的射频泄漏)。

(6) 衬垫材料要安装在不易被损坏的位置。例如,对于大型的屏蔽门,衬垫应安装在门框内,并提供一定的保护;对于可拆卸的面板,最好将衬垫安装在活动面板上,这样当拆下面板时,便于存放。

(7) 安装衬垫的金属表面一定要清洁、导电,以保证导电的可靠性。

(8) 尽量采用槽安装方式,槽的作用是固定衬垫和限制过量压缩。使用槽安装方式时,屏蔽体的两部分不仅通过衬垫实现完全接触,而且还有金属之间的直接接触,因此,具有最高的屏蔽效能。

安装槽的形状有直槽和燕尾槽两种。直槽加工简单,但衬垫容易掉出;燕尾槽则没有这个问题。槽的高度一般为衬垫高度的75%左右(具体尺寸参考衬垫厂家要求的压缩量),宽度要保证有足够的空间允许衬垫受到压缩时伸展。衬垫安装在直槽内时,衬垫需要固定,用导电胶粘接有两个缺点:一是会增加成本,二是导电胶会发生老化而导致屏蔽效能下降。这里建议用非导电胶,在紧固螺钉穿过的地方滴一小滴。这样,粘胶的地方虽然不导电,但是金属螺钉起到了导电接触的作用,并且屏蔽效能比较稳定。

(9) 根据屏蔽体的基体材料选择适当的衬垫材料,使接触面达到电化学兼容状态。如果空间允许,在安装衬垫的缝隙处同时使用环境密封衬垫,并且使环境密封衬垫面对外部环境,防止电解液进入导电衬垫与屏蔽体接触的结合面。

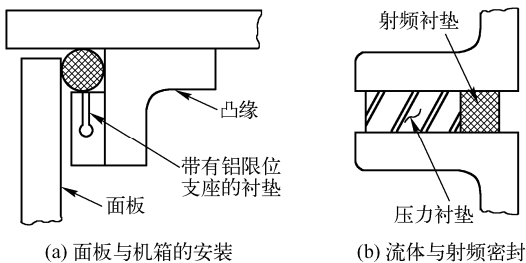


图 8-65 专用导电衬垫的安装

这种衬垫事先把导电带条与压力密封的橡胶带条胶合在一起。为确保这类衬垫实现压力密封，必须施加足够的压力，紧固螺钉的间距要适当减小。

8.1.5.6 磁屏蔽材料

磁屏蔽材料由铁磁合金制成，具有很高的磁导率，既能防止敏感器件受外界磁场影响（如有极射线管），也能防止器件产生发射（如变压器）。

（1）特性

常用的三种软磁材料如表 8-13 所示， $\mu$  金属是一种商用的磁导率最高的材料，对应力很敏感，这些应力可能是由于跌落、弯曲、钻孔、切割等引起的，需注意的是防止材料发生饱和。Radio metal 4550 这种 50%镍合金比  $\mu$  金属磁导率低，但是具有较高的磁饱和强度。经常与  $\mu$  金属构成双层屏蔽来减小场强防止  $\mu$  金属发生饱和，也常单独使用在对屏蔽要求不是很严格的地方。Radio metal 36 是一种含 36%镍的合金，它是一种最经济的铁镍合金屏蔽材料。它只用于干扰场强很大、频率较高的场合。

表 8-13 铁镍合金的基本物理特性

	最大磁导率 (H/m)	饱和感应强度 (T)	剩磁 (T)	居里温度 (℃)
$\mu$ 金属	110 000	0.77	0.45	350
Radio metal 4550	40 000	1.6	1.0	530
Radio metal 36	20 000	1.2	0.5	280

（2）应用

屏蔽通常是用金属板构成的，金属板上可以打孔、剪裁，然后用一个胎具来形成屏蔽，板材缝隙处可以焊接或搭接。对于搭焊建议搭接宽度为 9.5mm，焊点间距为 13mm，为了更美观，也可以将整个缝隙焊起来，但要使用  $\mu$  金属或 Radio metal 做辅料，具体取决于母体材料。这种方法不能用于材料厚度小于 0.8mm 的场合。另一种制造方法是制造深拉伸罐体，这种方法能构成最好的屏蔽体，因为屏蔽体上没有接缝，但是罐体的尺寸会受到限制。

（3）磁屏蔽胶带

对于小器件或者屏蔽要求不严格的场合可以用薄胶带卷起来达到屏蔽的效果，通常要绕数圈，这相当于多层屏蔽。因此，最好的方法是边绕边进行实际的测试，这种方法很容易进行修改，但很难获得比较好的屏蔽效果。

8.1.5.7 屏蔽织物

金属化纺织物是由一些纺织或编制材料作芯材制成的，这些材料包括尼龙、聚酯或纤维编织

（10）一般情况下，螺钉安装在衬垫内侧或外侧并不是十分重要，但是在屏蔽要求很高的场合，螺钉要安装在衬垫的外侧，防止螺钉穿透屏蔽箱，造成额外的泄漏。

图 8-65（a）为用于机箱面板的导电衬垫结构。这里使用带有铝限位支座的导电衬垫，面板装入机箱的位置由铝支座厚度来定。图 8-65（b）给出了兼有压力和电磁密封的导电衬垫安装结构。

而成,也可以用玻璃纤维,碳纤维。通常这些纤维的直径范围是  $10\sim 250\mu\text{m}$ ,表面金属涂覆层的厚度为  $0.1\sim 5\mu\text{m}$ ,这些材料可通过蒸发或溶解的工艺生产。常用的金属化纺织物由一定范围的镍镀层构成,金属化的特性不会改变织物的如下特性,如褶皱、质地、撕扯强度、收缩程度、延伸率等。

### 1. 屏蔽织物的种类

电磁波屏蔽织物的种类大体上可分为三大类:一是使用了功能性纤维的屏蔽织物;二是进行防辐射后整理的屏蔽织物;三是带有金属丝网夹层的屏蔽织物。

在第一大类中,功能性纤维可以采用纯粹由无机金属材料制成的纤维,如不锈钢纤维;也可以是在金属纤维的表面涂上一层塑料后制成的纤维;或者是外包金属的镀金属纤维,如镀铜、镀镍、镀铝、镀锌、镀银的聚酯纤维、腈纶纤维等。用这些纤维制成的屏蔽织物除了防电磁辐射性能外,通常还有质轻、柔韧性好等优点,其中用不锈钢金属纤维制成的屏蔽织物是较理想的电磁波防护面料。

防辐射后整理的屏蔽织物,使用金属银、镍、铜等喷涂织物,使织物具有电磁波屏蔽性。

综合比较而言,对织物进行后整理得到的屏蔽织物受外界环境的影响较大,不耐洗涤,手感僵硬;带有金属网夹层的屏蔽织物不能洗涤而且笨重,服用性能差;而采用金属纤维与普通纤维按一定比例混纺,通过特定的工艺使之充分混合均匀,制成成色一致的金属纤维混纺纱制成的织物不仅具有较好的电磁波屏蔽性能,而且耐久性良好,织物耐洗涤、耐高温、耐腐蚀、柔软透气、穿着舒适。

导电纤维及织物主要是指导电布和导电纸两类。导电织物制成的布料,既具有普通化纤布类似的物理机械性能,又具有很好的导电抗辐射性能,它们可以裁剪缝纫,做成各种防静电和防电磁辐射的工作服、射频和微波防护服、做成窗帘、屏蔽帐篷,还可以做成各种电子设备的屏蔽保护套(罩)。

导电纸是一种用导电纤维和木浆混合制成的纸。它所用的导电纤维是由聚酯纤维、玻璃纤维和云母镀银(或镍)制成的。导电纸和普通纸的强度和质量相仿,可以裁剪和折叠,其电磁屏蔽效果接近昂贵和笨重的金属屏蔽制品。用导电壁纸制造的 TEMPEST 级屏蔽可以将高达  $40\text{GHz}$  的电磁信号衰减  $100\text{dB}$  以上。而通常为了满足 TEMPEST 要求需要价格昂贵的由铜或铝箔构成的双层笼子。

这种材料可以用标准的非导电壁纸胶粘在墙上,不同的金属箔或金属夹层搭接的地方需要做导电性连接。缝隙处的泄漏由于无纺布结构中随机排布的镀镍碳纤维的存在而消除。纤维的随机分布构不成明显的截止波导。因此主要在  $1\text{GHz}$  以内具有较好的屏蔽性能。由于纤维还以随机的方式弯曲,因此这也有助于减小缝隙处的 EMI 泄漏。

这种壁纸很容易焊接。因此,即使在接合处也能保证电气的完整性,能够与由传统屏蔽材料构成的结构件形成有效的连接,构成法拉第屏蔽罩。由于重量轻、质地柔软,因此可以做成十分复杂的形状。

通过改变材料纤维的种类、长度、基材结构、密度和重量,材料可以对一定频率的电磁波具有屏蔽作用。典型的应用包括敏感集成电路器件的屏蔽包装、电子设备塑料机壳内的粘贴、屏蔽暗室、民用和军用汽车的防干扰、电子窃听防护和医院内图像扫描仪的机房。也有用这种材料防止飞机上的电子设备受到 EMI 和雷电的影响。

### 2. 屏蔽织物的性能

#### (1) 屏蔽效能

由一定标准的镍涂覆的编织物在用同轴方法测量时得到的信噪比为  $130\text{dB}$ 。这样的编织物在置于两片波导法兰之间或配合连接器使用时,在  $10\text{MHz}\sim 26\text{GHz}$  的远场情况下衰减有  $45\sim 95\text{dB}$ 。具体数据取决于特定的编织物与频率。

如此惊人的性能是由这些金属性材料的三个要素提供的。第一个是它具有较低的电气阻抗;第二个是编织物的表面完全用金属材料涂覆,在织物纤维交叉的地方提供了较低的接触阻抗;第

三个是编织物有限的厚度在高频时产生了一定的截止波导的作用。另外一种方法是纺织之前在塑料线上做导电涂覆,这样就失去了高导电性编织物在交叉点上有金属涂覆的主要特点。特别是在使用几个月以后,这种现象更加明显。因为这时线的交叉点部分发生一定的氧化。而这种现象不会发生在表面全涂覆的织物上。

## (2) 基材

构成织物的基材可以是各种可镀或可涂覆的非导电材料,甚至是导电材料。纺织的方法也有多种形式。主要的纺织方式是单线纺织和多线纺织。用特殊制造的线进行单线纺织,单线纺织的精度很高,线间距离是一定的。由于这些特点,金属化单线织物具有方型网格,这使它们具有较好的衰减特性。

一些细小的纤维在一起构成了多线。这些线纺织在一起构成的材料上面涂覆连续的金属层(通常为镍)。不同的纤维以及线之间的交叉点由金属涂覆层连接,因此不透气。

## (3) 易纺性

紧密屏蔽的接触点可以通过传统的缝制技术制造,包括三叠缝制,或使用经过精心设计的导电拉链、镀银的钩子等紧固装置连接。

同样也可以用银导电胶来形成低阻抗连接。有些导电编织物可以用低熔点焊锡焊接。其他连接方法包括铆接和用订书钉连接。这些纺织物也可以很容易用剪刀裁开。在实验室内可以方便地塞进机箱缝隙处用来改善设备的防干扰性能。

## (4) 透气性和透光性

有些金属化纺织物,特别是单线纺织型的,能够提供最大达到 50% 的开口面积,可以用于屏蔽窗、显示器屏蔽罩和通风窗等场合。它们的透光性不如导电膜。

## (5) 重量

金属纺织物上的金属镀层通常很薄( $0.1\sim 5\mu\text{m}$ ),材料的基材具有较低的密度。例如,典型的单线纺织材料密度为  $70\sim 80\text{g/m}^3$ ,直流电阻为  $60\sim 70\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ ,屏蔽效能 1GHz 时超过 70dB;而多线纺织物的密度为  $130\sim 140\text{g/m}^3$ ,直流电阻  $85\sim 105\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ ,屏蔽效能 1GHz 时超过 62dB。

## (6) 应用

对于金属化纺织物可以在它的一面或双面涂覆绝缘材料,这样就可以将材料的屏蔽效能和防水性能结合起来。这种应用的例子是室外广播器材的罩子、屏蔽服、便携式的屏蔽房和帐篷等。这些纺织物也是波导衬垫的理想材料。

### 3. 屏蔽织物的屏蔽机理

屏蔽织物的屏蔽机理主要是利用防电磁波能力较高的金属纤维对电磁波的反射功能。当电磁波辐射在织物上时,织物中均匀分布的金属纤维成为导电介质而将部分电磁波反射回去,减少了电磁波的透过量。随着织物中金属纤维含量的增多,导电介质面区域增大,反射能力愈强,透射量愈小,屏蔽作用也就愈好。

### 4. 屏蔽织物开发的工艺要点

导电布可由如下三种不同的工艺制成:

(1) 在化纤织物上镀铜或镍后做成化纤镀金属导电布。它对高频和微波具有良好的屏蔽性能。

(2) 把导电布和树脂复合在一起制成吸收导电布。它选用了能够吸收电磁波的树脂,因而比导电布具有更好的屏蔽效能。

(3) 用导电良好的金属或碳黑拉成纤维,然后和化纤混合纺织制成导电织物。由于导电纤维和化纤比例可以调配,因此,这种导电混纺织物的导电性能可以人为控制。

金属纤维表面不平整,摩擦系数大,密度大,刚度大,纤维的韧性比普通的纤维要差,弹性

差、脆性强、容易断，并且导电，其可纺性与普通纺织纤维相比有很大差异，织染等各道工序要改变许多工艺参数和设备，并采取特殊的技术措施，才能保证纺纱、织造、染整顺利进行，随着金属纤维含量的增加，纺、织、染的难度也相应增加。

① 纺纱要点。金属纤维与普通纤维的混纺工艺主要采用条混多道并合的方法，使金属纤维充分均匀混合，然后经过粗、细纱纺成所需号数的混纺纱线，在混纺的并、粗、细各工序，工艺上要采取低车速、重加压、轻定量，大隔距、通道光洁、防缠防堵、勤换钢丝圈等措施，以保证牵伸的稳定，提高成纱强力及条干均匀度等指标。

② 织造要点。络筒、整经工序要采用小张力、低车速的工艺以减少经纱断头和摩擦起毛，清纱器采用光电式代替电容式，浆料采用特殊的配方，目的在于提高经纱的耐磨性能，减少因摩擦而引起的金属纤维脱落。织造采用低车速、小张力，开口投梭时间等参数要按照织物中金属纤维含量、用途和要求来选择。

③ 染整要点。金属纤维织物后处理时可采用氯漂工艺，退浆时可使用酶退浆与碱退浆结合，减少烧碱用量，依据金属纤维织物和其他纤维混纺比例的不同，要采用不同的染色方法，尽量不使用强氧化剂，以免纺织金属纤维氧化、溶解、腐蚀而降低屏蔽性能。

#### 5. 屏蔽织物性能检测

屏蔽织物除了应具备普通织物的物理性能指标外，还应具备很好的屏蔽性能。通常用屏蔽衰减值（也称隔离度）来反映屏蔽织物遮挡电磁波的效果。导电织物的屏蔽效能通常能达到 50~60dB，隔离度达到 20dB，就能满足屏蔽的要求，相当于电磁波通过织物后衰减了 4 万倍，即透射量仅为入射量的万分之一。表 8-14 给出了代号为 J002A 的屏蔽织物在不同波段频率下的隔离度数值。

表 8-14 J002A 屏蔽织物的隔离度

微波频率 (MHz)	隔离度 (dB)	微波频率 (MHz)	隔离度 (dB)	微波频率 (MHz)	隔离度 (dB)
1 000	36.2	3 300	38.7	5 750	53.8
1 300	31.5	3 600	36.3	8 260	26.2
1 600	30.6	3 900	36.2	9 200	26.1
1 800	28.4	4 100	38.7	10 000	24.2
2 100	29.1	4 500	41.2	11 000	27.3
2 600	35.0	5 000	34.1	12 000	28.3
3 000	36.5	5 500	32.9		

#### 6. 电磁波屏蔽织物的应用

电磁波屏蔽织物可广泛应用于军事、通信、医学、工业和家庭等方面，如织物中金属纤维的含量不同，用途亦不同，如表 8-15 所示。

表 8-15 金属纤维防电磁屏蔽织物用途

产 品 名 称	金属纤维含量 (%)	用 途
防雷达侦察遮障布	3~5	坦克、大炮伪装服
防微波辐射服	5~15	用作人身防护
屏蔽用贴墙布	5~15	防止外来信号干扰及防止敌方侦察
假雷达靶子	20	迷惑敌人
除电布	20	消除器皿或材料带电
高压带电作业服	30~40	不停电检修输电线路

电磁波屏蔽织物的研究和开发具有良好的社会意义和应用前景,但从目前情况看,还有许多需要进一步研究的课题及工作。

① 对于开发成功的产品,应尽快制定标准,提高产品质量与使用性能,扩大对外宣传,开拓国内外市场。

② 应及时制定电磁波屏蔽织物的国家标准,有利于企业的规范和发展。

③ 目前只有少数人认为电磁波对人体有害而采用工作服,大多数接近电磁波的人对此还缺乏足够的认识,因此应加大市场宣传力度。国家也应依据环保要求制定相应的劳保法规及颁布相关政策,提高人们的自我保护意识。

④ 对于金属纤维纺纱,仍存在着金属纤维束不易牵伸、并条与粗纱易涌头、细纱的粗细节多、混合不均和断头率高等问题,高含量纺纱更是明显,所以应进一步探索工艺、改善纺纱质量,提高生产效率,降低加工成本。

随着人们对电磁环境的重视和科学技术的进步,近年来,又有许多新型的屏蔽织物研制成功。如服装面料用不锈钢纤维、棉纤维、涤纤维和麦饭石纤维混合纺织而成,穿起来和普通服装没什么差别,但具有防电磁辐射、抗静电、耐洗涤、透气性好、柔软、舒适和保健等功能。

多离子织物是对纤维进行离子化处理。该产品以吸收为主,将有害的电磁辐射能量通过织物自身的特殊原理转变成热能散发掉,从而避免了环境二次污染、净化了空气。由于织物中含有大量金属阳离子可起到杀菌除臭作用,对皮肤无刺激,有助人体表皮微循环。同时具有防静电、防部分X射线及紫外线等功能。多离子织物是目前国际上屏蔽低、中频段电磁辐射先进的民用防护材料。

#### 8.1.5.8 电磁辐射个体防护用品

##### 1. 电磁辐射个体防护产品的使用范围

电磁辐射个体防护产品可应用于下述场合。

(1) 直接从事电磁波作业及间接接受电磁影响人员的防护。

(2) 带心脏起搏器及其他对电磁辐射敏感人群的防护。

(3) 可与其他吸波材料配合,制成多频谱兼容伪装隐身材料,将在现代军事战争中发挥重要作用。

除了上述个体防护的范围以外,还可根据实际需要,做成窗帘、屏障,对特殊环境予以防护;做成罩、套,对有关的电磁波辐射源进行屏蔽防护。

##### 2. 根据测试结果选用电磁个体防护设备

随着人们物质文化水平的不断提高,各种家用电器,如彩电、录像机、VCD、家用电脑、微波炉、电磁炉、无绳电话、手机等相继进入千家万户,这些家用电器和电子设备在使用过程中都会向环境空间发射与泄漏一定强度的电磁波,电磁辐射已成为继水污染、大气污染、噪声污染之后当今人们生活中的第四大污染。因此,许多研究机构和生产厂家都在相继研究开发防电磁辐射的民用产品,以减少电磁辐射对人类健康的危害。现在看来,穿着防电磁辐射的服装是比较方便有效的方法。

一般来说,作业人员所处环境的电磁场强度超过国标限值,或者作业人员所处环境的电磁场强度未超过国标限值,但与此限值比较接近,而作业人员又需要长时间在此环境工作时,都应考虑采用辐射防护用品。选用个体防护产品时,应首先确定电磁辐射的衰减度,然后,参照各种产品说明中对电磁波的衰减参数,确定使用何种形式的防护用品。降低电磁辐射方



面的个体防护用品主要包括防护服、防护眼镜及辐射防护屏。

目前国内已经开发出多种面料的防护服。例如，防护衬衫，防护围裙，防护马甲，防护大褂，护胎宝，孕妇裙，夹克套装等，此外还有用于设备屏蔽的屏蔽布等。表 8-16 列出了常用的电磁辐射方面的个体防护产品、制成材料及屏蔽效能。

制成防护服的面料对于电磁波的防护起着决定性的作用。因此在选用电磁辐射防护服时，应了解防护服所采用的面料，是否是大的专业厂家制造的，并且是否有电磁辐射专业检测部门的检测证书。在确保这两条的前提下，再考虑服装的做工和美观是否符合要求。

防护服是根据屏蔽或吸收原理制作的。防护眼镜是用于保护操作人员的眼镜免受伤害，对防护眼镜的要求是：透视度要足够高，不影响视线；屏蔽效果要好（原则上应保证屏蔽后场强控制在国标限值之下）；重量轻，镜面启动灵活。防护眼镜的基本材料是金属网或金属膜。

表 8-16 常用电磁辐射个体防护产品

品 名	采用功能性的材料	屏 蔽 效 能
男衬衫	不锈钢纤维	20~30dB
女衬衫	不锈钢纤维	20~30dB
男短袖衬衫	不锈钢纤维	20~30dB
女短袖衬衫	不锈钢纤维	20~30dB
防护围裙	不锈钢纤维	20~30dB
防护马甲	不锈钢纤维	20~30dB
	金属化镀膜材料	20~30dB
防护大褂	不锈钢纤维	30~40dB
	金属化镀膜材料	30~40dB
孕妇裙	不锈钢纤维	20~30dB
肚兜	不锈钢纤维	20~30dB
孕妇裤	不锈钢纤维	20~30dB
夹克防护套装	不锈钢纤维	30~40dB
屏蔽布	不锈钢纤维布	50~58dB
	化镀膜膜布	50~58dB
屏蔽布（面料）	不锈钢纤维	20~30dB
屏蔽里子绸	不锈钢纤维	10~18dB
屏蔽衬衫布	不锈钢纤维	20~30dB
防护屏（玻璃）	14~17 英寸镀膜	20~25dB
防护镜	平镜镀膜	10~15dB
	近视及其他功能镀膜	10~15dB

8.2 滤波防护设计

本节介绍滤波器的一些基本特性和类型、防干扰技术中专用吸收滤波器的设计原则、电磁干扰滤波器组成元件的特性，以及滤波器的安装要求等（不涉及电子线路中的信号滤波器具体设计与计算）。

8.2.1 概述

8.2.1.1 滤波器的种类

滤波技术的基本用途是选择信号和抑制干扰，为实现这两大功能而设计的网络称为滤波器。常按功用把滤波器分为信号选择滤波器和电磁干扰滤波器两大类。信号选择滤波器有效去除不需要的信号分量，同时对被选择信号的幅度和相位影响最小。电磁干扰滤波器是以有效抑制电磁干扰为目标的滤波器，它与普通滤波器相比具有下列特点：

（1）对于一般信号选择滤波器，要求它在应用的频率范围内获得完善的阻抗匹配，使传输的信号无传输损耗或只有很小的损耗。但对于电源滤波器，则要在所抑制的电磁干扰信号的频率范围内实现最大可能的失配，使所要抑制的电磁干扰信号受到最大可能的衰减，这是电源滤波器和信号择滤波器最本质的区别。因此，使用在电源线上的电磁干扰滤波器总是在阻抗失配状态下

工作。

(2) 电磁干扰频谱很宽, 从低频到超高频都存在电磁干扰能量。滤波器元件在这个频率范围内高频特性显得十分复杂, 难以用元件的等效集总参数来表示滤波器的高频特性。

(3) 电磁干扰滤波器在阻带范围内应有足够衰减量, 把传导干扰电平抑制到规定范围内。

(4) 电磁干扰滤波器对传输的有用信号或电源工作电流的损耗应降低到最低限度。

一般滤波器按抑制方式分类又可分为反射式和吸收式。反射式滤波器的工作原理是将不需要的频率分量反射回信号源或干扰源, 而让需要的频率分量通过滤波器进入接收电路, 以达到选择或抑制的目的。一般 LC 滤波器属反射式滤波器, 其缺点是当它和信号源不匹配时, 一部分有用能量会被反射回信号源, 导致干扰电平的增加。

为拓宽抑制带宽, 在电磁干扰滤波器中有一类吸收式滤波器, 使有用信号能有效地通过, 不需传输的干扰能量则被其转化为热能。吸收式滤波器又名损耗滤波器。一般做成介质传输线形式, 所用介质是铁氧体或其他损耗材料。铁氧体在交变磁场作用下会产生涡流损耗、磁滞损耗和剩余损耗, 这类损耗随磁场频率的升高而增加。损耗滤波器就是利用这一特性, 消耗掉不需要的传输信号的干扰分量。

滤波器按频率特性可分为高通滤波器、低通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器等。按结构组成可分为 LC 滤波器、RC 滤波器、声表面滤波器、陶瓷滤波器、晶体滤波器、机械滤波器、螺旋滤波器和微带滤波器等。从形式上可分为 C 形、T 形、L 形和 H 形等, 图 8-66 列出了几种常用的阻容滤波器。

图 8-66 中, 图 (a) 是 T 形低通滤波器 S; 图 (b) 是  $\pi$  形低通滤波器; 图 (c) 是  $\Gamma$  形低通滤波器; 图 (d) 是双 T 形带阻滤波器; 图 (e) 是桥 T 形带阻滤波器。

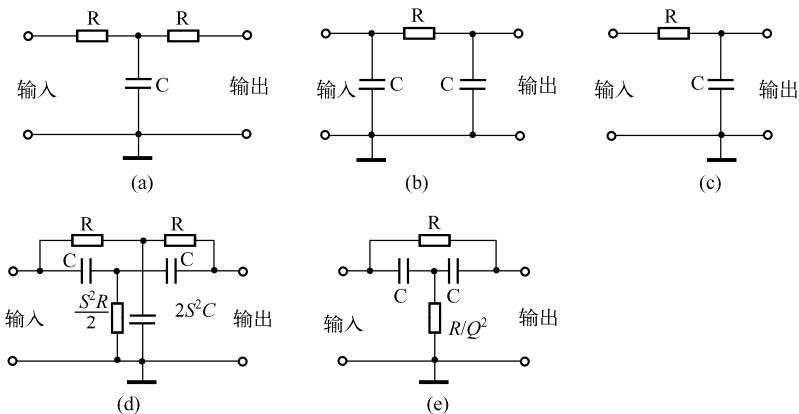


图 8-66 滤波器的基本形式

上述简单滤波器电路的频率特性往往不能满足动态性能要求, 需要采用复杂的多级网络滤波器, 可应用网络综合理论进行分析和设计。

### 8.2.1.2 滤波器的特性参数

在电路中一般常见的滤波器串接在信号源与接收电路之间, 可等效成四端网络。滤波器最主要的特性参数有插入损耗、工作环境条件、输入输出阻抗、可靠性、频率特性、额定电压、额定电流、体积、重量、温升及可靠性等。

(1) 额定电压 指输入滤波器的最高允许电压值。滤波器的额定电压必须确保在预期条件

下都能可靠地工作,留有较大的安全系数。若输入滤波器的电压过高,会使内部电容损坏。对外界过电压和浪涌瞬态电压的危害应予以充分考虑。

(2) 额定电流 指在额定电压和规定环境温度条件下,不破坏滤波器中电阻和电感器性能的最大允许电流。该电流应尽可能与滤波电感线圈导线的额定电流相等,并和滤波器串接的开关及熔丝的额定电流相适应。额定电流不足,将导致电感线圈的磁饱和及温升加剧。使用温度越高其允许的工作电流就越小。同时,工作电流还与频率有关:工作频率越高,其允许电流也越小。

(3) 可靠性 滤波元件的可靠性应与设备的全寿命要求相一致,应高于设备内部其他元件的可靠性。这是因为防电磁干扰的滤波器的故障往往比其他元件的故障更难查找和排除。

(4) 频率特性 它是描述其选择性或对干扰抑制功能的参数,通常用中心频率、截止频率以及上升和下降斜率表示。

(5) 输入、输出阻抗 为使工作时的滤波器频率特性与设计值相符,要求与它连接的信号源阻抗及负载阻抗的数值等于设计时的规定值。对于商品滤波器,考虑到使用时信号源阻抗及负载阻抗具有不确定性,或者将在很大的范围内变化,为使滤波器具有比较平稳的滤波特性,可以在它的输入端和输出端同时并接一固定电阻作适当调整。

从信号源到滤波器输入端的阻抗称为输入阻抗,滤波器输出到接收电路的阻抗称为输出阻抗。对于信号选择滤波器需要考虑阻抗匹配,以防止信号衰减。

(6) 插入损耗 当电路未接滤波器时,信号源在接收电路端电压为  $U_1$ ,接入滤波器后在电路输入端电压为  $U_2$ 。定义滤波器的插入损耗由式(8-10)表示,即

$$L_{is} = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} \quad (8-10)$$

插入损耗  $L_{is}$  的值通常随工作频率而变。

### 8.2.1.3 滤波电容器

实际的电容器除呈现电容特性外,还含有电阻和电感成分。其中电阻部分包括电容器金属膜电极的电阻、介质的损耗、电极金属膜与引出线之间的接触电阻等;电容器的电感部分由作为电极的金属膜卷绕后形成的电感和引出线的自感组成。

工作频率高于电容器自谐振频率后,电容器失去其固有特性,呈感性阻抗。图 8-67 所示为 0.1pF 电容器的阻抗与频率的关系,该电容器的自谐振频率在 2.7MHz 附近。

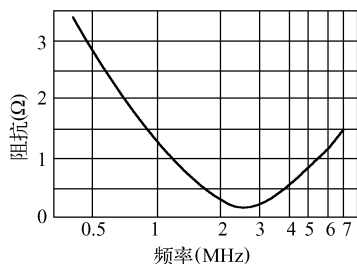


图 8-67 电容器的频率特性

电容器上限使用频率受到自谐振频率和损耗因素的制约。

金属化聚丙烯薄膜介质电容器的容量稳定,绝缘电阻高,适于作电磁干扰滤波电容器。

#### (1) 穿心电容器

穿心电容器的结构如图 8-68 所示。电容的两极片由金属薄膜卷绕而成,并各自向一端延伸到

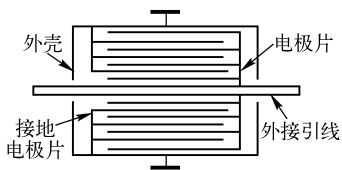


图 8-68 穿心电容器结构

极片的绝缘薄膜之外,然后再将其焊接到各自的盘状端片上。穿心电容器由金属薄膜卷绕而成,其中一个端片和中心导电杆焊在一起,另一端片与电容器壳焊在一起,是一种短引线电容,它的特殊结构使其自谐振频率可达 1GHz 以上。

穿心电容器价格低廉,常安装在用电设备的外壳上,并且将外壳极与接地的金属外壳连接,另一个导电杆串接在导线上,使

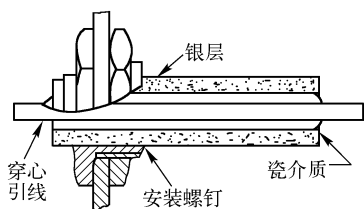


图 8-69 瓷管式穿心电容器结构

电容器形成对干扰信号的分路作用，常作电源中共模干扰的高频滤波之用。

瓷管式穿心电容器是另一种常用的穿心电容器。它的结构不同于上述金属薄膜卷绕式，采用高介电常数的陶瓷作为介质，在瓷管的内外表面涂以银层作为电极，其中外表面与安装螺钉焊在一起，瓷管的内表面与穿过瓷管的引线焊接，如图 8-69 所示。瓷管穿心电容器电容容量在数千皮法到数万皮法左右，常作电源供电滤波用。

## (2) 三端电容器

除了简单的电感形滤波器以外，任何低通滤波器都要使用旁路电容。理想的旁路电容的衰减具有随频率的升高以每十倍频程 20dB 的规律增加的特性。但是实际的电容器由于引线电感的存在，滤波器的高频性能受到限制。三端电容是一种特殊结构的电容器，它与普通电容器的区别在于：它有三根引线，其中一个电极上有两根引线。这样一个微小的改变，却使电容器的高频滤波效果发生了很大的改善。普通电容的引线电感对于电容的高频滤波作用是有害的，而三端电容却巧妙地利用了引线电感，构成了一个 T 形低通滤波器，如图 8-70 所示。

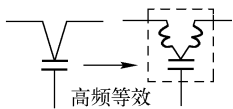


图 8-70 三端电容器

### 8.2.1.4 滤波电感器

实际电感器总有损耗电阻和分布电容，若分别用集总参数表示，其等效电路如图 8-71 所示。电感线圈在低频端呈感抗，其阻抗随频率成比例地增加，当电感  $L$  与分布电容  $C_0$  达到并联自谐振时，阻抗最大，呈纯电阻。高于自谐振频率后，电感线圈因分布电容的作用将转呈容性。因此电感线圈的使用频率应低于其自谐振频率。

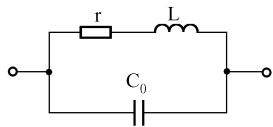


图 8-71 电感线圈等效电路

为提高电感线圈对电磁干扰的抑制能力，必须使电感量尽可能大。在给定体积的条件下，增加电感量就得增加线圈匝数，而匝数的增加又要导致体积和分布电容的增大。为解决这个矛盾，可采用磁芯（环、罐）线圈。为了减小分布电容，应尽量采用单层线圈或分段、蜂房式绕制的多层线圈。

## 8.2.2 馈通滤波器

由于电路的工作频率和周围环境中的电磁干扰频率越来越高，将滤波器安装在电路板上所暴露出的高频滤波不足的问题日益突出。解决高频滤波的根本方法是使用馈通形滤波器。馈通形滤波器安装在金属面板上，具有很低的接地阻抗，并且利用金属面板隔离滤波器的输入和输出，具有非常好的高频滤波效果。

### 8.2.2.1 馈通滤波器的类型

#### 1. 按电路结构分类

馈通滤波器的电路结构有 C 形（单个穿心电容）、L 形（一个穿心电容加一个电感）、T 形（两个电感加一个穿心电容）、 $\Pi$  形（两个穿心电容加一个电感）等。选用馈通滤波电路的依据如下：

(1) 对干扰的衰减量 馈通滤波器的电路器件越多，则滤波器的过渡带越短、阻带的插入损耗越大，一般对于干扰信号的衰减也越大。

(2) 有用信号与干扰信号在频率上的差别 有用信号与干扰信号的频率相差越小, 需要滤波器的器件数量越多。

(3) 使用馈通滤波器的电路阻抗 一个基本的原则是: 滤波器中的电容对着高阻抗电路, 电感对着低阻抗电路。这里的所谓高低, 可以以  $50\Omega$  为参考。

## 2. 按安装形式分类

根据安装形式, 馈通滤波器可分为以下三种。

(1) 焊接式滤波器 适合于安装空间狭小、不能使用安装工具或硬件的场合。可选择 C、L、 $\Pi$  等形式的电路; 电压范围: 500V, DC/AC (400Hz)。

(2) 螺装滤波器 使用配套的螺母和垫圈可以方便地安装在过孔上, 双端密封结构能够提供理想的环境保护, 主要用在信号线、数据线和直流线的滤波上。有各种螺纹规格以及 C、L、 $\Pi$  等形式的电路供选择; 电压范围: 1500V, DC; 220V, AC, 400Hz。

(3) 大电流、高电压螺装滤波器 适合于大电流的 5V 逻辑总线、 $\pm 48V$  (DC) 电话交换机柜总线、大电流开关电源和直流充电系统。电流可达 100A; 安装方便。电压范围: 250V, DC; 240V, AC, 400Hz。

### 8.2.2.2 馈通滤波器的安装

馈通滤波器的使用方法有以下三种:

(1) 安装在屏蔽体 (屏蔽盒、屏蔽机箱等) 的面板上 这是最基本的使用方法, 当有导线要穿过屏蔽体时, 就需要在屏蔽体的面板上安装馈通滤波器, 使导线通过馈通滤波器穿过屏蔽体。

(2) 安装在线路板的地线层上 在多层线路板上, 可以利用线路板的地线层做隔离层和接地层。

(3) 安装在电路之间的隔离板上 当馈通滤波器不能安装在屏蔽体面板或地线面上时, 安装在金属隔板上也具有普通电容 (包括三端电容) 不可比拟的高频滤波作用。

焊接式安装的优点是节省空间、滤波性能可靠。但在将滤波器焊接到面板上时, 由于面板的热容量远大于滤波器的热容量, 焊接的局部温度有可能达到很高, 造成滤波器损坏。因此, 焊接时要注意控制焊接的时间和温度。

螺纹安装方式简单易行, 可以在面板上打通孔, 用螺母将馈通滤波器拧紧, 也可以直接在面板上打带螺纹的孔, 将馈通滤波器直接拧上。

无论使用哪一种方法, 要注意两点, 一是扭矩不能太大, 馈通滤波器虽然从外表上看与螺钉一样坚固, 但是由于内部是空心的, 扭矩过大会造成损坏; 二是在安装时要套上锯齿垫片, 这样可以保持良好的接触。

### 8.2.2.3 滤波阵列板

滤波阵列板和滤波连接器是馈通滤波器概念的两种延伸。当需要滤波的导线数量较多时, 逐个焊接或安装馈通滤波器是十分烦琐的事, 这时可使用滤波阵列板或滤波连接器。

滤波阵列板一般用在机箱内部, 板上的滤波器已经由厂家使用特殊工艺焊接好, 性能可靠, 使用简便。滤波阵列板上的滤波器的间隔为  $2.54\text{mm}$ , 因此扁平电缆的接头可以直接插上, 避免了逐根焊线的烦琐, 便于组装。使用滤波阵列板时, 要注意的问题是: 一定要在滤波阵列板与安装面板之间安装电磁密封衬垫, 否则在缝隙处会有很强的电磁泄漏。

对于机箱外部的电缆进行滤波必须使用滤波连接器, 这样才便于电缆的插拔。一般滤波连接

器的外形尺寸与普通连接器是完全相同的，可以直接取代普通连接器。不同的是滤波连接器的每个针（孔）上安装了一个低通滤波器，滤除信号线上的高频干扰。

### 8.2.3 电源线滤波器

电源滤波器属于抑制干扰滤波器的一种，又称为电源线滤波器、电源噪声滤波器等。每一台电子设备都需要电源供电，有的由电网提供 220V 交流电，有的供给直流电。不论是交流电源还是直流电源都会产生比较严重的电磁干扰，影响设备的功能和性能。因此所有军用、民用电子设备都在相应的防干扰标准中规定了电源线传导干扰的电平极限值。既要限制进设备的传导干扰电平，又要限制设备向电网发射传导干扰，以此严格控制电源中的电磁污染。通常抑制电源线的干扰最主要而有效的方法就是采用滤波器。从频率选择的角度来说，电源滤波器属低通滤波器，它能够毫无衰减地把直流电源和交流电源的功率输送到设备上去。

#### 8.2.3.1 电源线上干扰的类型

一般来说，电源线的干扰信号来自多方面，如广播、通信、导航、移动通信的发射信号，它们都在电子设备的连接电缆上生成感应信号；电动机启动或感性负载电路产生瞬态过程；使用医疗设备所产生的传导干扰和辐射干扰；在电子设备内部也产生形形色色的电磁干扰信号，如数字信号、脉冲信号等。

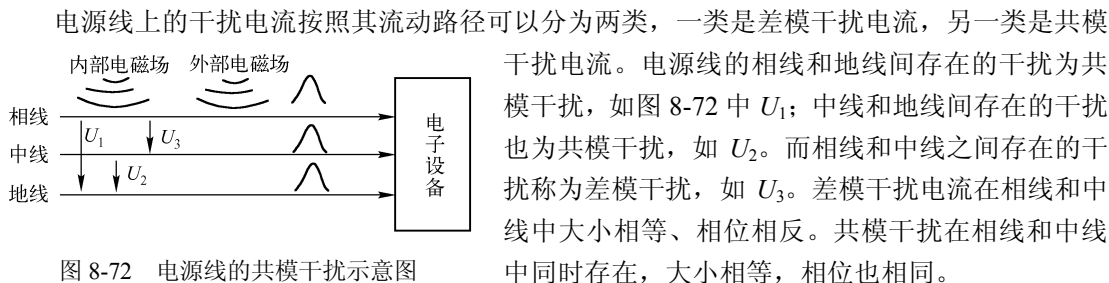


图 8-72 电源线的共模干扰示意图

由于这两种干扰的抑制方式不同，因此正确辨认干扰的类型是实施正确滤波方法的前提。可从以下三个方面进行判断：

（1）从干扰源判断 雷电、设备附近发生的电弧、设备附近的电台或其他大功率辐射装置在电源线上产生的干扰是共模干扰；另外，如果发现电源线上的干扰是来自机箱内的线路板或其他电缆，则为共模干扰，这是因为通过空间感应到火线和零线上的干扰电流是同相位的。在同一路电力线上工作的电动机、开关电源、晶闸管等会在电源线上产生差模干扰。

（2）从频率上判断 差模干扰的频率主要集中在 1MHz 以下，而共模干扰的频率一般分布在 1MHz 以上。这是由于共模干扰是通过空间感应到电源线上的，这种感应只在干扰信号频率很高时才容易发生。

（3）用仪器测量 用一台频谱分析仪和一只电流卡钳就可以进行测量。电流卡钳实际上是一个绕在磁芯上的线圈，当被测电缆穿过卡钳时，就形成一个变压器。被测导体相当于变压器初级，卡钳中的线圈相当于变压器次级，电缆上的信号会耦合到卡钳中的线圈上，用频谱分析仪即可检测出来。

#### 8.2.3.2 电源滤波器的结构

一般电源滤波器由 LC 低通网络构成，针对不同性质的干扰，分为共模滤波网络和差模滤波

网络。图 8-73 (a) 为共模滤波器，由电源的相线和中线上分别串接电感  $L$ ，再分别对地线并接电容器构成。图 8-73 (b) 为差模滤波器。

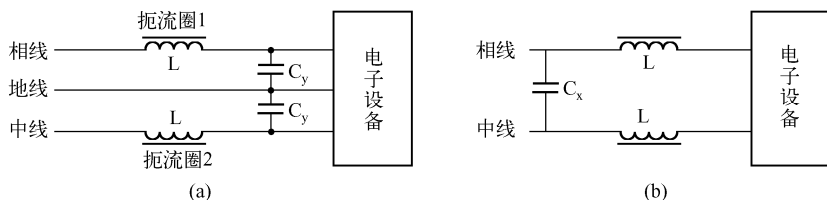


图 8-73 共模滤波网络和差模滤波网络

实际上，在电源线中往往同时存在共模和差模干扰，因此，实用的电源滤波器是由共模滤波电路和差模滤波电路综合构成的，如图 8-74 所示，其中两个电感是绕在同一磁环上的两个独立线圈，它们所绕匝数相等，绕向相反，使在两个线圈内通过的共模电流所产生的磁通在磁环内相互抵消，以免磁环达到磁饱和状态，这样可保持两线圈的电感值稳定。

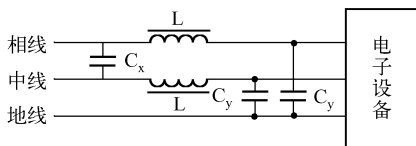


图 8-74 电源基本滤波器

电源滤波器是由集中参数元件构成的无源四端网络，电源滤波器具有互易性。负载接到滤波器的电源端，或者接到负载端，原则上都是可以的。特别是在电源内阻与负载电阻相等时，这种互换接法测得的插入损耗也是相等的。而在实际应用中，必须根据滤波器两端将要连接的电源阻抗和负载阻抗来选择电源滤波器的结构和参数，才能取得满意的滤波效果。

开关电源与线性稳压电源相比，省去了笨重的电源变压器，体积小、效率高，具有明显的优点。然而开关电源本身所产生的电磁干扰也是非常严重的干扰信号，占有很宽的频率范围，又有一定的幅度，因而对电子电路是一个很大的威胁。必须采用专门设计的开关电源滤波器才能有效抑制它产生的干扰信号。

开关电源滤波器的结构，如图 8-75 所示。由图可见，开关电源滤波器的网络结构比常用电源滤波器的网络增加了两个独立的差模抑制电感  $L_1$  和  $L_2$ 。使  $30 \sim 400\text{kHz}$  传导干扰受到明显衰减。在电源端增加了两个电容器，在电源入口处组成了抑制共模干扰的单元件滤波网络。

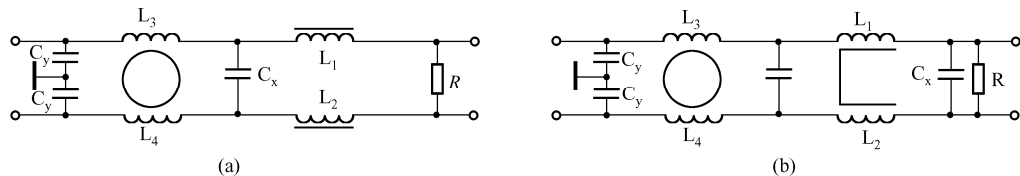


图 8-75 开关电源滤波器结构

### 8.2.3.3 电源滤波器的选购要点

目前已有各种用途、不同类型的商品电源滤波器出售，因此可以十分方便地根据需要选择使用。但在选择电源滤波器时必须仔细了解滤波器的性能：首先是电压、电流，其次是插入损耗，最后是结构尺寸。由于滤波器内部一般是经过灌封处理的，因此环境特性不是主要问题。但是所使用的灌封材料和滤波电容器的温度特性对电源滤波器的环境特性有一定影响。

### 1. 滤波器的主要用途

例如,考虑滤波器是用于仪器设备,还是用于电力系统;是用于单相电源供电,还是三相电源供电。

### 2. 电压、电流对使用效果的影响

从原理上讲,交流电源线滤波器既可用于交流电源上,也可用在直流电源上;但直流电源线的滤波器不能用在交流场合,这是因为直流滤波器中的电容器的耐压比较低;而且有可能其交流损耗较大,导致过热;另外,由于直流滤波器使用了容量较大的共模滤波电容器,如果用在交流场合会产生漏电流超标的问题。因此直流电源滤波器绝对不能用在交流场合。交流滤波器用在直流场合,从安全的角度看没有问题,但要付出成本和体积的代价。

当电源线滤波器的工作电流超过额定电流时,不仅会造成滤波器过热,而且会导致滤波器的低频滤波性能降低。例如,使电感的磁芯饱和,甚至产生谐波,增加压降。超过额定电压,则可能使滤波器的电容器击穿。

### 3. 电源的工作频率和漏电流

滤波器标明的工作频率为 50Hz、60Hz 或 400Hz。一般滤波器适用于 0~400Hz 的电源频率,但漏电流值与工作频率及电压成正比。所谓漏电流指在滤波器工作时,通过旁路电容,从相线、中线流至地线的电流。漏电流过大不仅对灵敏电路产生干扰,而且带来用电不安全因素。

### 4. 确定所需要的插入损耗

首先,在设备的电源入口处不安装滤波器,对设备进行传导发射和传导敏感度的测量,并与要满足的标准进行比较,看两者之间相差多少分贝;接下来,接入滤波器,其作用是弥补上这个差距。图 8-76 以抑制设备的传导发射为例,给出了确定滤波器插入损耗的过程。首先将设备的传导发射值最大包络线(a)与标准给出的限制值线(b)相比较,计算其差值,得到需要的插入损耗值(c)。由于电源线滤波器是低通滤波器,将插入损耗线(c)变换为低通滤波器插入损耗的形式(d), (d)就是滤波器需要提供的插入损耗值。

曲线(d)并不是低频滤波器的特性,而是一个带阻滤波器的特性,这是考虑到实际滤波器的非理想性。另外,如果从厂家的产品样本上选择插入损耗值满足(d)的滤波器,十有八九会失败。因为厂家产品样本上的数据是在滤波器两端阻抗为  $50\Omega$  的条件下测得的,而实际使用条件并不是这样。在实际使用条件下,滤波器的插入损耗会有所降低。为了保险起见,在从产品样本中选择滤波器时,应加 20dB 的裕量,这就得到了曲线(e)。所以,从产品样本上选择滤波器,其插入损耗应满足曲线(e)的要求。

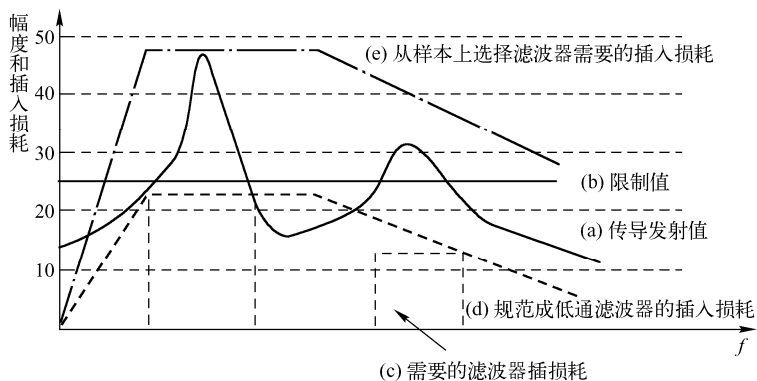


图 8-76 确定滤波器的插入损耗



### 5. 影响电源线滤波器外形尺寸的因素

安装滤波器的空间往往是一个很棘手的问题,因为电子设备空间日益趋小。人们经常将滤波器的体积作为一项重要的指标来考虑,总是希望滤波器的体积越小越好。滤波器的体积主要由滤波电路中的电感所决定,电感线圈的体积越大,滤波器的体积就越大。以下因素会影响电感的体积:

(1) 额定电流 当滤波器的额定工作电流较大时,电感线圈要使用较粗的导线,这自然会增加体积;另外,为了防止磁芯发生磁饱和现象,往往要使用体积大的磁芯,这也会增加体积。

(2) 低频特性 当需要滤波的干扰信号频率较低时,扼流圈的电感量需要很大,于是导致电感元件的体积增大。一般地,开关电源的频率越低,则需要滤波器中的电感量就越大。

### 6. 实际电源线滤波器与理想滤波器的差距

理想的电源线滤波器是低通滤波器,但实际的电源线滤波器通常是带阻滤波器。造成这种差别的原因是电容器和电感器的非理想性。电容器的引线是有电感的,而电感线圈上又存在着寄生电容,尽管这些电感、电容很小,但当频率较高时,它们的影响是不能忽略的。因此,由实际电感、电容器构成的低通滤波器电路在频率较高时,就变成了一个带阻滤波器电路。

滤波器的电路结构仅决定了滤波器的低频特性。要想提高滤波器的高频性能,生产时需要从许多方面注意制作工艺,如选用电感小的电容器、制作寄生电容小的电感、焊接时使电容器的引线尽量短、在内部采取适当的隔离等。

上述这些注意事项对正确选择和使用电源滤波器十分重要,除了正确选择滤波器之外,滤波器的安装也是十分重要的环节。

#### 8.2.3.4 电源滤波器的安装

滤波器的安装质量对实际衰减特性影响很大,只有把滤波器正确地安装到设备或设施上,才能获得预期的衰减特性。滤波器的安装应遵循如下几个要点:

(1) 电源供电线的滤波器应安装在设备或屏蔽壳体的电源入口处,并予以屏蔽。屏蔽体应与设备壳体良好搭接。

(2) 滤波器中电容器引线应尽可能短,以免其感抗与容抗在较低频率上谐振。电容器和其他元件应正交安装,减小相互耦合。

(3) 滤波器的接地导线上对地电流会造成有害电磁辐射,所以滤波器抑制元件自身要进行良好的电磁屏蔽和接地处理。

(4) 焊接在同一插座上的每根导线都必须进行滤波,否则会破坏滤波器滤波的有效性。

(5) 滤波器的电源输入线不能在屏蔽箱体内部暴露。

(6) 滤波器的输入和输出引线之间应予以屏蔽,更不得往返交叉,否则输入与输出引线之间的耦合将导致滤波实际抑制特性下降。

(7) 选用带电源开关和插座的滤波器组合件,可使结构设计大大简化。

#### 1. 电源滤波电路直接安装在线路板上的利与弊

电源线滤波器的电路是如此简单,一个诱人的想法是直接将滤波电路安装在线路板上的电源线入口处,这样既能够节省空间,又能够降低成本。另外,由于滤波器的实际衰减特性与它所连接的网络有关,因此在实际使用中不可避免地要对滤波器的参数进行调整;将滤波器安装在线路板上,能够很方便地按照电路情况进行调整。

将滤波电路直接安装在线路板上,从电路的角度看是完全可行的,但是从电磁干扰滤波的实际情况看,却有些问题。首先,如果希望滤波器具有良好的高频性能,电容的引线必须短,且应直接连接到金属机壳上;当将滤波电路元件安装在线路板上时,这一点是很难做到的,除非在设计线路板和安装结构时统一考虑这个问题。其次,机箱内线路板、电缆等产生的辐射会直接感应到滤波器电路上的各个部位,导致滤波器失效。这个问题在高频时尤其突出。

图 8-77 所示的方案为设计人员方便地解决了这个问题。一个关键的器件是安装在机箱面板上的内含电容滤波网络的插座。这个插座内部安装了共模扼流圈和滤波电容器,电容器的安装严格遵循引线最短、前后隔离的原则。之所以仅在线路板上安装共模滤波器,是因为差模干扰已被线路板上的滤波器滤除,感应到电源端口上的都是共模电流。

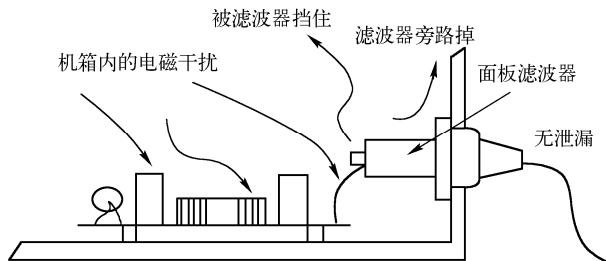


图 8-77 线路板上安装滤波器的方案

## 2. 电源线滤波器安装方法的对与错

电源线滤波器从外观上看是一个两端口网络,许多人认为只要按照接线图将滤波器串在设备和电源之间就可以了。这是一个十分错误的概念。下面通过讲解几种连接方法的错误所在,使读者了解和掌握应该怎样正确地安装电源线滤波器。

### (1) 电源输入线过长

人们在安装滤波器时,通常并不注意其安装位置,而是在机箱内随便找一个方便的位置,将滤波器固定好,然后将导线连接上,这样就容易犯图 8-78 所示的错误;这里的错误是滤波器的电源输入端导线过长,其后果是电网上的干扰进入设备后,还没有经过滤波器,就通过空间耦合到线路板上,对电路造成干扰。而设备内部的干扰会直接感应到电源线上,传出设备。

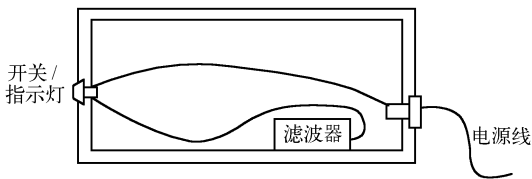


图 8-78 滤波器的安装错误——电源线过长

发生这种错误的另一个情况是,大部分设备的电源输入口安装在设备的后面板,而电源开关、指示灯等元件安装在设备的前面板;这样电源线进入设备面板后,先连接到前面板,然后再连接到滤波器上;这时,尽管滤波器距电源线入口很近,但是仍会出现同样的错误,如图 8-78 所示。

因此,滤波器安装的正确位置是靠近电源线的入口,而且滤波器的电源输入线要短。

### (2) 滤波器输入线、输出线靠得过近

图 8-79 中,滤波器的输入线和输出线捆扎在一起。这样,高频干扰信号实际会通过输入线和输出线直接发生耦合,而将滤波器旁路掉。

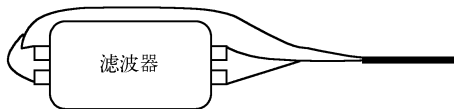


图 8-79 滤波器的安装错误——输入、输出发生耦合

### (3) 滤波器接地不良

首先,必须明确滤波器的外壳必须接地,即必须接金属机箱,这从滤波器的电路中可以看出,只有当共模电容接地时,才能够将线路上的共模干扰旁路掉;同时为了对高频起到有效的旁路作用,要求电容的引线越短越好。当滤波器没有接地时,电路中的共模滤波电容实际是不起作用的。

正是为了接地,滤波器的外壳上通常有一个专用的地线接线端子。虽然这个接线端子的目的是为了更方便地安装接地导线,但它却造成了一种滤波器使用中常见的错误,即人们通常认为只要将这个接线端子接地就可以了;因此,在实际设备中,常常见到人们用一根长导线将滤波器连接到设备机壳上,如图 8-80 所示。这时,这根接地线基本形同虚设,因为在高频时,长导线的阻抗是很大的,根本起不到对干扰有效旁路的作用。

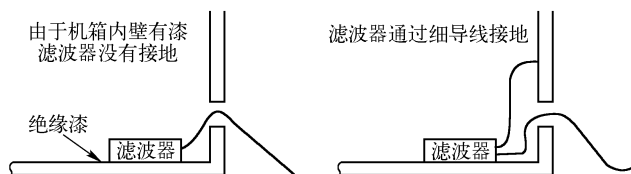


图 8-80 接地不良的滤波器

另外,图 8-80 中滤波器与设备金属壳之间有绝缘漆,滤波器根本没有接地,或者通过紧固螺钉连接都是不正确的。

导线的直流电阻和交流阻抗是完全不同的,滤波器绝不能靠单根导线接地,而要与设备金属外壳之间有大面积的导电接触。正确的安装方式是将滤波器的外壳大面积贴在设备金属壳的导电表面上。如图 8-81 所示,滤波器直接贴在电源入口处,并在接触面上使用电磁密封衬垫,利用设备外壳实现隔离。

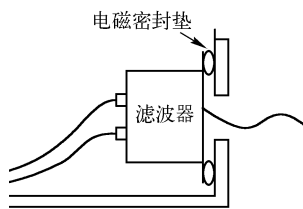


图 8-81 滤波器的理想安装方式

## 8.2.4 信号线滤波器

### 8.2.4.1 信号滤波器的用途

信号滤波器是用在各种信号线(包括直流)上的低通滤波器,在电子设备中的用途可分为以下几种:

#### 1. 屏蔽体上的穿线

屏蔽壳体上不允许有任何导线穿过屏蔽效能再高的屏蔽体,一旦有导线穿过屏蔽体,屏蔽体的屏蔽效能就会大幅度下降,这是因为导线充当了接收干扰和辐射干扰的天线。当有导线要穿过屏蔽体时,必须使用馈通滤波器,这样可以将导线接收到的干扰滤除到接地的屏蔽体上,从而避免干扰穿过屏蔽体。

#### 2. 设备内部的隔离

现代的电子设备的体积越来越小,器件的安装密度越来越大。随之而来的是数字电路与模拟电路之间的干扰、强信号电路与弱信号电路之间的干扰等问题,这些问题已经成为影响电子设备指标的重要因素。解决这些问题的唯一途径是对不同类型的电路进行隔离。当不同电路之间没有任何连线时,这种隔离是很容易的,只要按照一般的屏蔽设计技术做就可以了。但当电路之间有互连线时,必须对互连线进行滤波,才能达到真正的隔离。这时要在互连线上使用馈通滤波器或滤波器阵列。

### 3. 电缆滤波

前已指出, 电缆本身是一条效率很高的辐射和接收天线, 它造成的危害如下:

(1) 造成很强的超标辐射。机箱内的电磁能量在电缆上感应出共模电压和电流, 共模电流在电缆上流动就产生了共模辐射。这种辐射往往是设备产生超标辐射的主要原因。

(2) 设备周围环境空间中的电磁能量被电缆接收后, 形成共模电流, 沿着导线传进机箱, 一方面对与电缆直接连接的电路产生干扰, 另一方面借助导线再次辐射, 对机箱内的其他电路(没有直接与电缆连接的电路)造成干扰。

(3) 造成屏蔽体或隔离层被破坏。产生这种作用的原因也是电缆的对电磁波的接收和再次辐射, 导致电磁能量通过电缆泄漏。

解决电缆接收和辐射干扰的主要手段是屏蔽和滤波。虽然使用屏蔽电缆能够有效地减小电缆的电磁干扰辐射和接收电磁干扰的能力, 但屏蔽电缆的屏蔽效能对屏蔽层的端接方式依赖很大, 而且屏蔽电缆的屏蔽层由于是金属编织网构成的, 在高频时屏蔽效能较差。此外, 屏蔽电缆不能消除共模干扰电流。为了改善这种状况, 在屏蔽电缆的两端使用馈通滤波器是有效的方法。

#### 8.2.4.2 电缆滤波器

铁氧体是一种立方晶格结构的亚铁磁性材料, 它的制造工艺和机械性能与陶瓷相似, 但颜色为黑灰色, 故又称黑磁性瓷。在抑制电磁干扰应用方面, 对铁氧体性能影响最大的是铁氧体材料的特性——磁导率, 它直接与铁氧体芯的阻抗成正比。铁氧体一般通过三种方式来抑制无用的传导或辐射信号。首先, 将铁氧体作为实际的屏蔽层来将导体、元器件或电路与环境中的散射电磁场隔离开。其次, 将铁氧体用作电感器, 以构成低通滤波器, 在低频时提供感性-容性通路, 而在较高频率时损耗较大。最后, 最常用的应用是将铁氧体芯直接用于元器件的引线或线路板级电路上。在这种应用中, 铁氧体芯能抑制任何寄生振荡、感应或传输到元器件引线上或与之相连的电缆线中的高频无用信号。

用铁氧体做成的损耗滤波器具有低通滤波特性。将铁氧体材料填充在电缆里就可以制成电缆滤波器, 其特点是体积小, 只需较短的一段电缆就可获得理想的高频衰减特性。图 8-82 给出了两种电缆滤波器的结构。电缆滤波器的高频和低频谐振均与电缆长度及横截面积无关, 因而可采用自动化程序生产多种系列滤波器, 以满足各种需要。

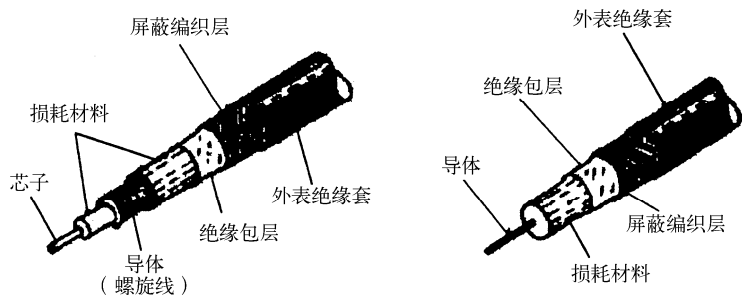


图 8-82 电缆滤波器结构

#### 8.2.4.3 滤波连接器

滤波器连接器是将滤波单元合并连接器上, 形成一个精巧、小型互连器件, 可滤除 EMI。最常用的结构是将电容器安装在连接器内部的每个触点与地之间, 连接器外壳接地。滤波器对地路径短而直, 因此引线电感最小。把滤波单元装入连接器中, 能节约 5~10cm 的空间。

把铁氧体直接组装到电缆连接器内构成滤波连接器,如图 8-83 所示。它在 100MHz~10GHz 的很宽频率范围内能获得 60dB 以上的衰减。

滤波连接器对于解决电缆造成的干扰十分有效。但是滤波连接器的价格较高,并且不是所有型号的连接器的都有对应的滤波连接器,这给实际工程带来很大不便。如果对空间的限制不严,可以自己制作滤波连接器,其效果与成品相同(甚至更好,

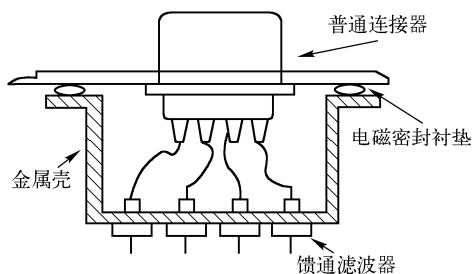


图 8-84 自制滤波连接器

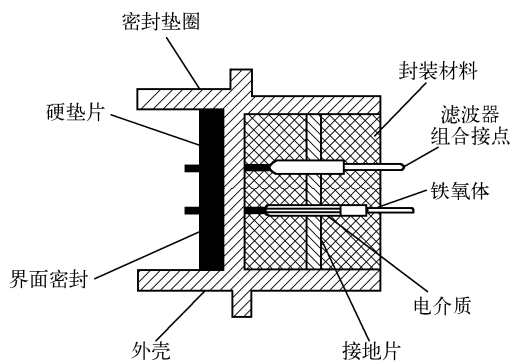


图 8-83 滤波连接器

因为有些

成品滤波连接器内的滤波器件接地不太可靠)。自制滤波连接器的方法有两个,一个是在设备面板上安装上选好的连接器后,在连接器的后面装一个屏蔽盒,屏蔽盒上安装馈通滤波器(或滤波阵列板),如图 8-84 所示。另一个是将选好的连接器与馈通滤波器(阵列板)安装在一个独立的金属盒内,构成一个滤波部件。

#### 8.2.4.4 磁环扼流圈

##### 1. 电磁干扰抑制铁氧体磁环的优点

电磁干扰抑制铁氧体与普通铁氧体的最大区别在于它具有很大的损耗,用这种铁氧体做磁芯制作的电感,其特性更接近于电阻。它是一个电阻值随频率增加而增加的电阻,当高频信号通过铁氧体时,电磁能量以热的形式耗散掉。电磁干扰抑制铁氧体磁环、磁珠等由于使用方便、价格低廉而备受设计人员的青睐,它的主要优点如下:

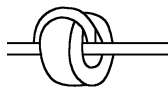


图 8-85 磁环扼流圈

(1) 使用非常方便,如图 8-85 所示,直接套在需要滤波的电缆上即可。

(2) 不像其他滤波方式那样需要接地。因此,对结构设计、线路板设计没有特殊的要求。

(3) 作为共模扼流圈使用时,不会造成信号失真,这对于传输高频信号的导线而言非常可贵。

因为导线穿过磁环后,在磁环附近的一段导线具有单匝扼流圈的特性,其阻抗将随着电流的频率升高而加大,因此对电源线中的高频分量具有抑制衰减作用。这种磁环不仅在电源线应用,而且在数字信号线中也有应用。

##### 2. 使用注意事项

要充分发挥铁氧体的性能,下面一些注意事项十分重要。

(1) 铁氧体磁环(磁珠)的效果与电路阻抗有关。电路的阻抗越低,则铁氧体磁环或磁珠的滤波效果越好。因此,在一般铁氧体材料的产品手册中,并不给出铁氧体材料的插入损耗,而是给出铁氧体材料的阻抗;铁氧体材料的阻抗越大,滤波效果就越好。

(2) 电流的影响 当穿过铁氧体的导线中流过较大的电流时,滤波器的低频插入损耗会变小,高频插入损耗变化不大。要避免这种情况发生,在电源线上使用时,可以将电源线与电源回流线同时穿过铁氧体。

(3) 铁氧体材料的选择 应根据干扰波的频率不同来选择不同磁导率的铁氧体材料。铁氧体材料的磁导率越高,低频时的阻抗越大,高频时的阻抗就越小。

(4) 铁氧体磁环的尺寸确定 磁环的内外径差越大, 轴向越长, 阻抗就越大。但内径一定要包紧导线。因此, 要获得大的衰减, 在铁氧体磁环内径包紧导线的前提下, 尽量使用体积较大的磁环。

(5) 共模扼流圈的匝数 增加穿过磁环的匝数可以增加低频的阻抗, 但是由于寄生电容增加, 高频的阻抗会减小。盲目增加匝数来增加衰减量是一个常见的错误。当需要抑制的干扰频带较宽时, 可在两个磁环上绕不同的匝数。

(6) 电缆上铁氧体磁环的个数 增加电缆上的铁氧体磁环的个数, 可以增加低频的阻抗, 但高频的阻抗会减小, 这是因为寄生电容增加的缘故。

(7) 铁氧体磁环的安装位置 一般尽量靠近干扰源。对于屏蔽机箱上的电缆, 磁环要尽量靠近机箱的电缆进出口。

(8) 与电容式滤波连接器一起使用效果更好 由于铁氧体磁环的效果取决于电路的阻抗, 电路的阻抗越低, 则磁环的效果越明显。因此当原来的电线两端安装了电容式滤波连接器时, 其阻抗很低, 磁环的效果更明显。

穿心电容器和磁环结合构成的高频滤波电路常用于抑制电源中共模高频干扰。例如, 电动机的电源控制线中, 由于电动机碳刷滑动接触发出的高频辐射和传导干扰, 通过电源线向电源传送, 或向其他电路传导。为防止辐射干扰, 应该采用金属屏蔽层将电动机罩起来, 然后用穿心电容器连接电源控制线, 并在线上加磁环, 这样可以有效地抑制辐射和传导干扰, 见图 8-86。

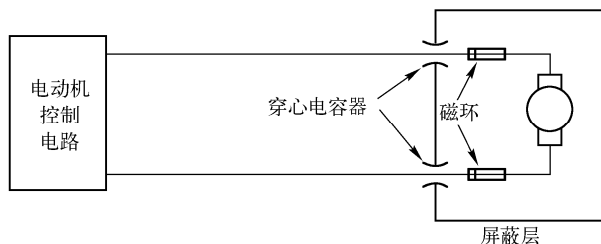


图 8-86 铁氧体环与穿心电容的组合应用

#### 8.2.4.5 陶瓷滤波器

陶瓷滤波器是利用陶瓷压电材料的压电原理制成的。在信号输入后, 由于压电逆效应而产生机械振荡, 由始端传到终端, 再由压电效应将机械能转换成电能, 变为电信号, 如图 8-87 (a) 所示。由于机械振动的频率特性很尖锐,  $Q$  值很高, 因此它可以得到很好的选择特性。

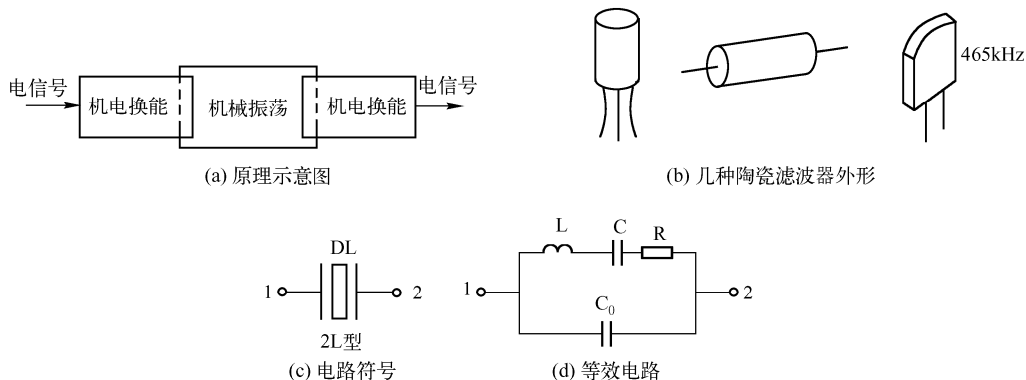


图 8-87 陶瓷滤波器

#### 8.2.4.6 晶体滤波器

晶体滤波器是利用石英振荡器代替一般的 LC 谐振电路制成的固体滤波器,可以获得十分尖锐的滤波特性。把石英晶体切成片状,制成晶片,当晶片两边施加不同极性的电压时,晶片的几何尺寸挤压缩或伸张。当高频交流电压加于晶片时,它将随交变信号的变化而产生机械振动。当外加信号频率与晶片固有振动频率相等时,机械振动最强,产生谐振现象。晶体滤波器就是利用这个原理制成的。

#### 8.2.4.7 表面声波滤波器

表面声波滤波器是利用声表面波器件的频响特性制成的,它体积小,成本低,工作可靠。在彩色电视机的接收电路中几乎全部采用这种滤波器件。

众所周知,声波分为纵波、横波和表面波三种传播方式,声表面波只在固体表面传播,透入表面的深度大约只有一个波长的范围,90%的声波能量都集中在表面范围内。它传播时引起的质点振动的轨迹是一个椭圆。物体表面光洁度对传播有影响,而弯曲表面并不妨碍其传播。通常声表面波器件采用具有压电效应的固体材料作为基片,在基片上设计指叉交错的金属换能器。把电信号加到换能器就能激发出声表面波,在另一端就会得到电信号。指叉换能器具有一个固有的中心频率,当电信号与中心频率一致时,就会产生共振,发出最强的声表面波,而那些偏离中心频率的信号分量,因其激发的声表面波很弱而被抑制。声表面波器件的这种频响特性与 LC 回路的谐振特性类似,然而却大大提高了其稳定性和可靠性,增强了接收机产品的性能一致性。

接收机滤波器实质上决定了接收机的频率选择性特性,因此滤波器在接收机设计中占有重要地位。接收机的滤波器通常分为预选滤波器和中频滤波器两种。预选滤波器一般设置在接收机的输入端,多数采用电调谐原理,通过改变电容器的电容量来达到调谐状态。滤波器根据中心频率设计成带通,以便抑制发射机的谐波信号和乱真信号,但是预选滤波器很难一次将干扰信号全部剔除,因此接收机的中频滤波成为继续抑制干扰的主要措施。多数接收机采用集中和分散相结合的布局,在混频输出和中频放大器之间设计一个性能优良的集中式滤波器,然后在中频放大器的级与级之间采用中频变压器结构实现滤波和阻抗匹配的功能。

接收机的滤波器与发射机滤波器的明显区别是不必过多考虑它的功耗和最大传输功率,一般接收机滤波器的传输功率比较小。

#### 8.2.4.8 信号滤波器的设计及安装

##### (1) 信号滤波器的选择

选择信号滤波器的步骤分为滤波器形式的选择、滤波器电路的选择、滤波器截止频率的选择等三步。

① 滤波器形式的选择。根据使用的场合,确定是板上滤波器、贯通滤波器还是连接器滤波器。当需要穿过屏蔽体的导线较多时,应选用滤波器阵列或连接器滤波器,可以提高可靠性、降低成本。当选用连接器滤波器时,与选用普通连接器时考虑的内容相同,即要考虑芯数、针或孔、安装方式、锁紧方式等。

② 滤波器电路的选择。根据设备超标的情况或要求的隔离度确定选用何种性能的滤波器,滤波器的性能越高,价格越高。 $\Pi$ 形滤波电路具有理想的干扰抑制效果,但价格很高。一般当信号是高速脉冲信号或对电磁兼容特性要求很严(如满足军标或 TEMPEST)时,应选用 $\Pi$ 形滤波电

路。Π形滤波器既能将高频干扰有效地滤除，又能保证波形的形状。

③ 滤波器截止频率的选择。根据信号的频率选择滤波器的截止频率，必须保证电路工作所必需的信号频率顺利通过滤波器，一般对有用频率的衰减要小于 3dB。

④ 其他。滤波器的工作电压、电流、温度范围等。

## (2) 安装注意事项

当设备出现了电磁干扰问题时，许多工程师会在电缆的端口上安装滤波电路（如滤波电容、RC 滤波电路、LC 滤波电路等），但经常达不到预期的效果。这是因为忽视了两个原因：一个是电缆上需要滤波的电磁干扰往往都是频率很高的电磁信号（无论是接收到的空间干扰，还是设备内传导到电缆上的干扰），而大部分滤波电路对高频干扰的滤波效果都是很差的（由于电容的引线电感、空间的寄生参数等）。另一个是滤波器安装的方式有问题（滤波器接地不良；滤波器的输入、输出端有耦合，空间耦合直接将滤波器旁路掉等），进一步降低了滤波器的高频滤波性能。要获得预期的效果，需要注意以下几点。

① 使用高频特性较好的滤波器件。如果在三端电容的两根连在一起的引线上分别安装一个铁氧体磁珠，则会大大增加 T 形滤波器的滤波效果。

② 使用信号滤波器时最重要的是保证滤波器有良好的接地，即保证有低的射频阻抗。要做到这一点，在使用板上滤波器时，应尽量使接地线短。在使用贯通滤波器时，要确保滤波器的外壳与屏蔽体的良好电接触，最好使用焊接方式。在使用连接器滤波器时，要在连接器与屏蔽体之间使用簧片或射频密封衬垫。另外，用于 I/O 接口滤波接地目的的地线要单独安排，并且仅与线路板的其他地线在一点连接（这称为“干净地”），在使用Π形滤波电路时这一点更重要。

③ 滤波器并排安装，否则已经滤波的和没有滤波的信号之间会发生串扰，使总体滤波失效。当需要滤波的引线较多时，使用多路滤波器。



## 第9章 接地与搭接技术

### 9.1 接地技术

接地技术是任何电子、电气设备系统都必须采用的重要技术。它不仅是保护设施和人身安全的必要手段，也是抑制电磁噪声、控制电磁干扰、保证设备可靠性的重要技术措施之一。在设计中如能把接地和屏蔽正确地配合使用，对实现电子设备的防干扰将起着事半功倍的作用。

接地，原意指与真正的大地连接，以提供雷击放电的通路，例如避雷针的一端埋入大地；后来成为给电气和电力设施提供漏电泄放通路的保护技术措施；发展至今，接地的含义早已延伸，它一般指连接到一个作为参考电位点（或面）的良导体的技术行为。其中的“地”可以是指大地，陆地使用的电子设备通常以地球的电位作为基准，并以大地作为零电位。“地”也可以是电路系统中某一电位基准点，并设该点电位为相对零电位。电子设备中各类电路均有电位基准，对于一个理想的接地系统来说，各部分的电位基准都应保持零电位。设备内所有的基准电位点通过导体连接在一起，该导体就是设备内部的“地线”。例如，电子电路往往以设备的金属底座、机架、机箱等作为零电位，但金属底座、机架、机箱有时不一定和大地相连接，即设备内部的“地”电位不一定与大地电位相同。

为了防止雷击对设备和操作人员造成危害，通常应将设备的机架、机箱等金属结构与大地相连接。电子设备的地与大地连接有如下作用：

（1）提高电子设备电路系统工作的稳定性。电子设备若不与大地连接，它相对于大地将呈现一定的电位，该电位会在外界干扰场的作用下变化，从而导致电路系统工作不稳定。如果将电子设备的地与大地相连接，使它处于真正的零电位，就能有效地抑制干扰。

（2）泄放机箱上积累的静电电荷，避免静电高压导致设备内部放电而造成干扰。

（3）为设备和操作人员提供安全保障。

理想的接地导体是一个零电阻的实体，任何电流在接地导体中流过都不应该产生电压降，各接地点之间不应该存在电位差。但是，如果接地不当就会引入电磁干扰。通常电路和用电设备的接地按其功能分成两大类，即安全接地和信号接地。

大地具有非常大的电容量，是理想的零电位，不论往大地注入多大的电流或电荷，在稳态时其电位保持为零。安全接地就是采用低阻抗的导体将用电设备的外壳连接到大地上，使操作使用人员不致因漏电或故障放电而发生触电危险。安全接地还包括建筑物、输电线铁架、高大电力设备的接地，其目的是为了防防止雷击放电造成设施破坏和人身伤亡。

信号接地就是在系统和设备中，采用低阻抗的导线为各种电路提供具有共同参考电位的信号返回通路，使流经该地线的各电路信号电流互不影响。

## 9.1.1 安全接地

### 9.1.1.1 设置安全地线的意义

#### 1. 当绝缘被破坏或设备感应带电时，安全地线能起保护作用

一般用电设备在使用中会由于绝缘老化、磨损、浸水、潮湿等原因，导致带电导线（或部件）与机壳之间漏电，或者由于设备超负荷引起严重发热烧损绝缘造成漏电，还会因环境气体污染、灰尘沉积导致漏电和电弧击穿打火。因此，任何高压电子设备的机壳、底座均需要安全接地，以避免高电压直接接触外壳或避免由于内部绝缘损坏造成漏电、打火，使机壳带电。

在图 9-1 中，若人体触及机壳，相当于机壳和大地之间连接了一个人体电阻。人体的电阻有很大的变化范围，当人体的皮肤处于干燥洁净和无破损情况下可高达  $40\sim 100\text{k}\Omega$ ；如果人体处于出汗、潮湿状态则使人体电阻降至  $1\,000\Omega$  左右。而流经人体电流的安全值，交流为  $15\sim 20\text{mA}$ ，直流为  $50\text{mA}$ ；当流经人体之电流高达  $100\text{mA}$  时，人就可能死亡。

我国设备用电电压是  $220\text{V}$ （单相）或  $380\text{V}$ （三相），当电源频率为  $50\sim 60\text{Hz}$  时，对人体有最严重的触电危害；更低或更高的频率反而不易引起人体触电死亡。为了保证安全，应将在正常情况下不带电的金属外壳与接地体连接，这样，当人体接触带电外壳时，大部分电流从接地电阻旁路流入大地，如图 9-2 所示。因接地电阻规定为  $5\sim 10\Omega$ ，流经人体之电流将减小为原先的  $1/200\sim 1/100$ 。

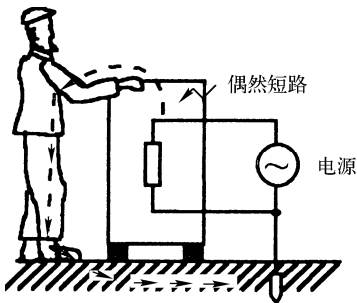


图 9-1 机柜不接地

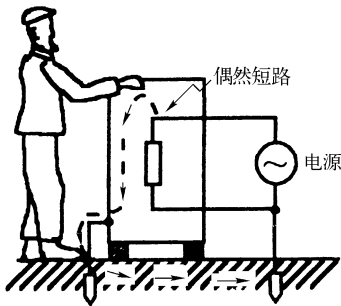


图 9-2 机柜接地

动力电气设备（如电动机等），通常由  $380\text{V}/220\text{V}$  供电，设备的金属外壳除了正常接地之外还应与电网零线相连接，称为接零保护。当动力设备外壳接地之后，一旦发生人与机壳相碰时，人体和接地电阻并联，由于接地电阻比人体电阻小得多，使漏电电流绝大部分从接地线中流过，如图 9-3（a）所示。但是接地电阻和电网中性接地的接触电阻两者在数量上相当，因此在接地线上的压降几乎为相电压  $220\text{V}$  的一半，即  $110\text{V}$ ，超过安全电压，使人体电流超过安全限度而遭遇危险。由此可见，在中性点接地的三相四线制供电情况下，动力设备不接地显然是危险的，然而即使接了地也不一定能保证安全，为此应该再将设备外壳接到供电电网的零线上，如图 9-3（b）所示。

在设备安全接地时，还应特别注意接地棒附近的跨步电压危险。当电流从接地棒流入大地时，在接地棒周围还会存在杂散电流和杂散电场，如图 9-4 所示。由于存在杂散电流，接地棒附近的地电位将升高，若人体跨步之间的电位差（也称为“跨步电压”）太高，将引起人身触电危险；而对于设备（或系统）来说，其连接于地的两点也会使设备受损坏或受干扰。

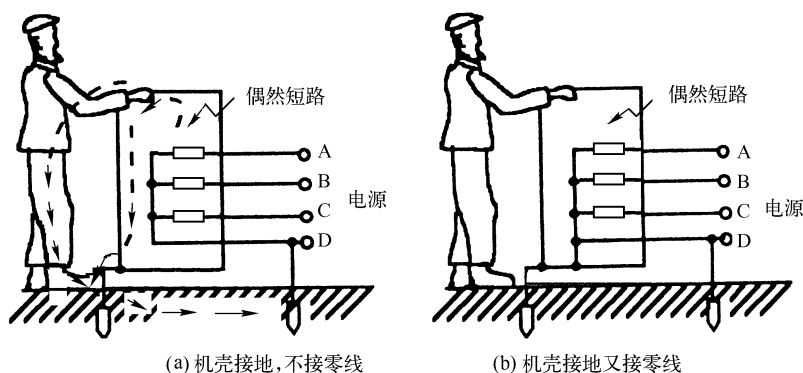


图 9-3 动力设备外壳的接零保护

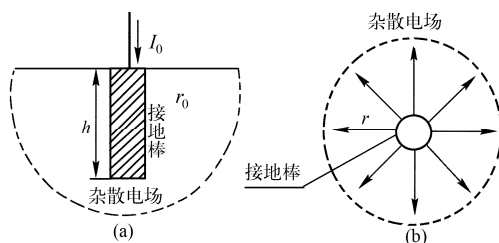


图 9-4 接地棒周围的杂散电场

## 2. 防雷接地

防雷接地就是将建筑物等设施 and 电气设备的外壳与大地连接, 从而保护设施、设备和人身安全, 使之免遭雷击; 同时消除雷击电流窜入信号接地系统, 以避免影响电气设备的正常工作。

防雷接地的作用在于把雷闪的强大电流引离敏感对象而导入大地, 并使由此引起的杂散电场降到安全水平以下。防雷措施——采用避雷针, 它是一种专门的接地装置。一个架设于高空的避雷针将雷电通过导体引入大地时, 在其周围形成一个保护区, 这个保护区是圆锥体形, 亦称圆锥保护区, 在保护区内的其他物体可以受到免遭雷击的保护。在接地中心产生杂散电场, 因此接地电阻越小越好, 但要做得太小会造成技术上的困难和经济成本上升; 实验表明, 接地电阻为  $10\Omega$  左右即可使附近的建筑物、电力系统变压器、输电线塔及其他露天设施得到保护。

一个完整的防雷装置包括接闪器、引下线和接地体。接闪器包括避雷针、避雷线、避雷网等。避雷针常采用镀锌的圆钢或钢管制成。圆钢直径不小于  $25\text{mm}$ , 钢管直径不小于  $40\text{mm}$ 。引下线应取最短的途径, 要尽量避免弯曲, 最好也采用镀锌材料, 所用圆钢直径不得小于  $8\text{mm}$ , 扁钢厚度不得小于  $4\text{mm}$ , 截面不得小于  $48\text{mm}^2$ 。

### 9.1.1.2 安全地线设置的方法

由上述分析表明, 为防止电子设备机箱带电或免遭雷击, 都需接大地。因此, 在进行电子设备机箱结构设计时, 必须在机箱上设置接地端子。对于小型电子设备, 机箱的接地可直接经安全电源插座中的接地插孔连接到大地上。

#### 1. 单相供电

为便于电子设备的机箱与安全地线连接, 实验室或安装电子设备的工作室常采用单相三线制供电,

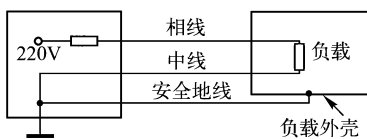


图 9-5 单相三线制供电线路

如图 9-5 所示。图中相线是 Y 形三相供电系统中的任一相，中线即 Y 形供电系统的回线，而安全地线就是机箱接入大地的导线。正常工作时安全地线不通过电流，无电压降，与之相连接的机箱都是地电位。功率不太大的电子设备，安全地线不一定与配电房的中线接地桩相接，可在试验室就近埋入接地桩，供安全地线接地之用。

## 2. 三相供电

当设备采用三相供电时，安全地线的设置有下列两种方案可供选择。

### (1) 三相五线制

设备的金属机箱及其金属件的接地线除通过接地桩就近接大地外，再引一根地线到变压器或发电机中心点与三相电源的零线相接，如图 9-6 所示。这样，三相不平衡电流不会通过设备地线，既保证了设备安全，也有利于消除工频附加干扰。

### (2) 三相四线-五线制

有些场所无法专设一根地线至供电变压器或发电机，这时可采用图 9-7 所示的三相四线-五线制接地系统。把设备机箱的接地线接入地桩后，再在总线入口处与电源零线端相接，这样可兼顾安全，并防止三相不平衡电流引起的工频干扰。

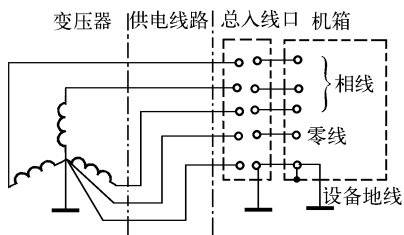


图 9-6 三相五线制接地系统示意图

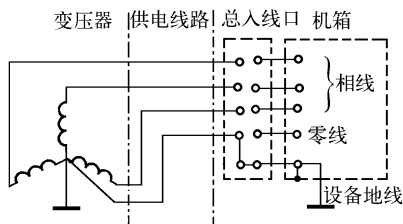


图 9-7 三相四线-五线制接地系统示意图

### 9.1.1.3 安全接地的有效性

接地的目的是为了使设备与大地有一条低阻抗的电流通路，而接地是否有效主要取决于地电阻；地电阻的阻值越小越好。

接地装置也称接地体，通常把它们分为自然接地体和人工接地体两大类型。埋设在地下的水管、输送非燃性气体和液体的金属管道、自流井插入管、钻管以及在地下建筑物及其水泥中的金属结构、电缆外皮等都属自然接地体。

一般自然接地体与大地接触面积比较大，杂散电阻较小，往往比专门设计的接地体性能更好。同时还由于自然接地体与用电设备在大多数情况下已经连成整体，大部分故障产生的漏电流能在接地体的开始段向大地流散，所以很安全。所以，在 1 000V 以下的系统和 1 000V 以上的小接地短路电流系统中，一般都采用自然接地体。

必须特别指出，在信号比较弱而设备对干扰极为敏感的测控系统、计算机系统、贵重精密仪器系统不能滥用自然接地体。例如，暖气管道，一般它与建筑以及大地并没有良好的接触，其电阻值比较大，因而不宜作为接地体。

对于大接地电流系统，由于要求接地电阻值较低，而自然接地体由于表面腐蚀等原因接地电阻难以降低，因此采用人工接地体。一般仅能利用地下管道作为辅助接地装置，必须以专门埋设的接地桩为主。而且还应注意到，当接地线中有直流电流时，管道材料会加速电化学腐蚀。

人工接地体是人工埋入地下的金属导体，常用的形式有下面几种：

(1) 埋设铜板 将铜板或用扁铜条围成框埋入地下，然后用多股铜线或铜带引出地面与试验室地线连接。

(2) 打入地桩 图 9-8 (a) 为圆形接地棒。接地棒表面一般镀铜或锌，以防止钢材生锈增大电阻。棒上端与地面上的金属结构件（如机柜或机房）相连，下端埋入地下一般深度达 3~4m，棒长一般 2~3m，棒的顶端离地面 1m 左右。

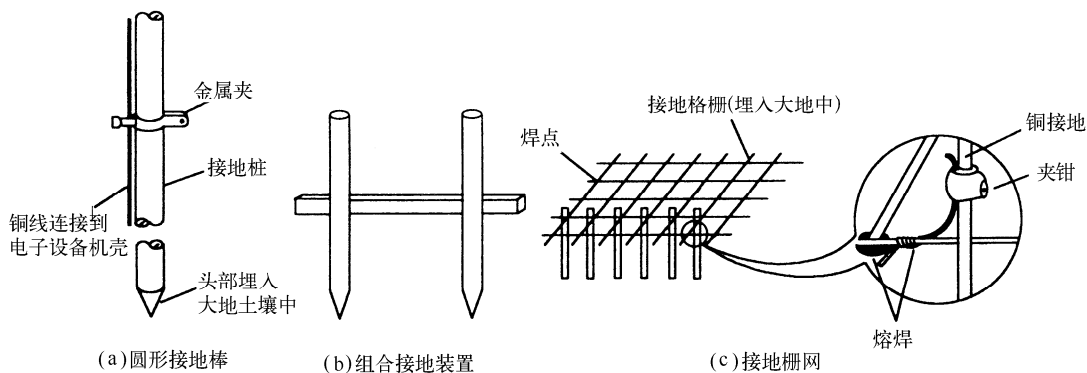


图 9-8 人工接地体结构

当一根桩的接地电阻太大时，可用多根同样粗的钢棒打入地下，再用导体并联连接成一体，连接导体与地桩应采用熔焊接头。如图 9-8 (b) 所示，其中钢管相隔 2~10m（一般为管长的 1~3 倍）。

接地栅网由接地棒和电导网格构成，如图 9-8 (c) 所示。栅网与地面上金属构件相连接，又将接地棒连接在一起。在现代建筑中，常常绕建筑物一周形成接地环，埋设于地基中。

(3) 钻孔法 即用钻机直接往地下打孔，一般深 10~30m、孔径 6cm 左右，然后把与孔深等长的接地棒埋入。

(4) 埋设导线 在地面挖深 0.6~1m、长几十米的沟，在沟内埋入铜导线，且在导线周围填入降阻剂。

总之，无论是自然接地体还是人工接地体，都必须根据接地电阻的要求来选择，设备安全接地电阻一般应在  $10\Omega$  以下，对于 1000V 以上的电力线路接地电阻要求小于  $0.5\Omega$ ；防雷接地电阻的一般要求为  $10\sim 25\Omega$ 。接地电阻可以使用专门的接地电阻测试仪进行测定，也可以通过理论计算来估计它的数值。

接地电阻属于分布电阻，通常它由接地导线的电阻、接地体的电阻和大地的杂散电阻三部分组成。其中大地杂散电阻起主要作用，因此接地电阻的大小不仅与接地体的大小、形状、材料等有关，而且与接地体附近的土壤特性有很大关系，如土壤的成分、土壤颗粒的大小和密度、地下水中是否含有被溶解的盐类等因素。表 9-1 列举了不同性质土壤的电阻率。

表 9-1 不同性质土壤的电阻率

类 别	名 称	含水量	$\rho (\Omega \cdot \text{cm})$
岩石	石灰石		$1 \times 10^7$
	碎石		$2 \times 10^5$
砂地	干砂		$2.5 \times 10^5$
	湿砂	很湿	$2.5 \times 10^4$
	含水黄砂	10%	$5 \times 10^4$
泥土	黄土	干的	$2.5 \times 10^5$
	砂土	10%	$3 \times 10^4$
	黏土	20%	$1 \times 10^4$
	混合土（黏土、石灰石、碎石）		$1 \times 10^4$
	砂质黏土		$0.8 \times 10^4$
	陶土	20%	$(0.4 \sim 0.8) \times 10^4$
水	河水		$1 \times 10^4$
	地下水		$(0.2 \sim 0.71) \times 10^4$
	湖水		$0.03 \times 10^4$
	海水		$(0.01 \sim 0.05) \times 10^4$

除此以外,接地电阻还受环境条件影响,天气的潮湿程度、季节变化和温度高低的变化都影响它的阻值。因此接地电阻的数值并不是固定不变的,需要定期测定监视。当出现接地电阻不符合要求时,可以采用保持水分、化学盐化和化学凝胶三种方法来有效地降低土壤的电阻率,使接地电阻减小。

最简单的降阻剂是木炭,以及土、水、盐三者混合的浆土,其配方比例为1:(1~2):0.2。但这种浆土易受到雨水和地下水的冲刷,其降阻效果不能长久。有一种降阻剂是在电介质的水溶液中加入滞留剂,从而在地桩周围形成凝胶状或固体物质,使其降阻效果持久不变。其配方之一为:氯化钾 0.8kg,硫酸氢钠 0.4kg,聚乙烯醇溶液 4.0kg,尿素 0.88kg,氧化镁 1.0kg,酚醛树脂 4.0kg,水 2.7kg。

## 9.1.2 信号接地

### 9.1.2.1 信号接地的方式

#### 1. 概述

信号接地就是为系统内部各种电路设置公共参考电位点(或面),主要目的是为了抑制电磁干扰。它与安全接地采用低阻抗导体必须与大地连接的形式是不一样的。信号接地的连接对象是种类繁多的电路,因此接地的形式也是多种多样的。

首先需要讨论信号接地系统的分类原则。在复杂的大系统中,既有高频信号,又有低频信号;既有频繁开关动作的设备,又有极为敏感的弱信号装置。这样的综合性系统,仅仅将电路按需要设置接地方式是不能满足电子设备防干扰要求的,还必须采用分门别类的方法将不同类型的信号电路分成若干类别,以同类电路构成接地系统。四类法是将所有电路按信号特性分成四类,分别接地,形成四个独立的接地系统。

四类法的第一类是敏感信号和小信号“地”,包括低电平电路、弱信号检测电路、传感器输入电路、前级放大电路、混频器等。由于这些电路工作电平低,信号幅度弱小,特别容易失效或降级,因而它们的地线应避免混杂于其他电路中。

第二类是不敏感信号和大信号电路的地线系统,包括高电平电路、末级放大器、大功率电路等。在这些电路中工作电流都比较大,地线系统中的电流也比较大,因而必须和小信号电路的地线分开设置;否则通过地线的耦合作用必然对小信号电路造成干扰,使电路不能正常工作。

第三类是干扰源设备地系统,它包括电动机、继电器、接触器等。由于这类元件在工作时产生火花或冲击电流等,往往对电子电路产生严重的干扰,除了要采取屏蔽隔离技术外,地线必须和电路分开设置。

第四类是金属构件地,它包括机壳、底板、机门、面板等。为了防止发生人身触电事故、外界电磁场的干扰以及摩擦产生静电等,必须将机壳等接地。

在工程实践中,按电路性质分类接地的措施还包括数字信号地和模拟信号地分别设置、交流电源的地和直流电源的地分开等分门别类的措施。它们都是抑制干扰行之有效的办法。

#### 2. 四种接地方式

在同一类电路中,有一个共同的接地导线系统(或接地面);根据各种电路接地点的连接方式不同,信号接地通常可以分成下述四种方式。

##### (1) 单点接地方式

单点接地只有一个接地点,所有单元电路的接地线都连接到一个点上,这个点作为参考电位点。图 9-9 表示三个单元电路的单点接地方式。

但实际上接地的三条连接导线会有两种布线方案：三条线各自引向接地点和三条线串联后连向接地点。不管怎么布线，导线上均有一定电阻，分析这些电阻的影响，会有两种可能的实际等效电路。当三条线分别引到接地点焊接时，其等效电路如图 9-10 (a) 所示。这种情况下，各设备（或各支路）的地电位仅与各自的地电流  $I$  及地线电阻有关，不受其他电路影响，对防止各电路之间的相互干扰及地回路干扰是很有效的。特别是当电路频率较低、连接导线比较短的场合，经常采用这种接地方式。它的缺点是不适用于高频电路。对于并列设备（或支路）多的情况，需要很多根连接地线，结构笨重。设备越多，势必布局分散，就会使地线导线加长，还会由于各地线间相互耦合，使线间电感耦合和电容耦合增大。

单点接地的另一种实际布线的等效电路如图 9-10 (b) 所示。图中 A、B、C 各点的电位不为零，且受其他电路的影响。因此，从防止噪声和干扰的角度，这种接地方式不适用。但这种接地方式的结构比较简单，各电路的接地线短，所以在设备机柜中是常用的一种接地方式。当然，如果各电路的地线中电流相差很大时就不能使用，因为各电路会通过接地线相互影响。

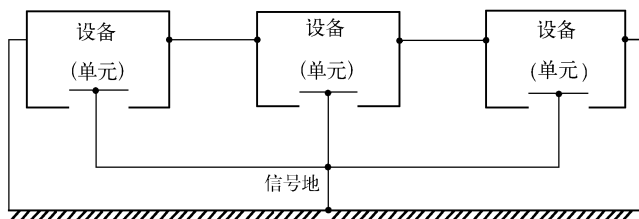
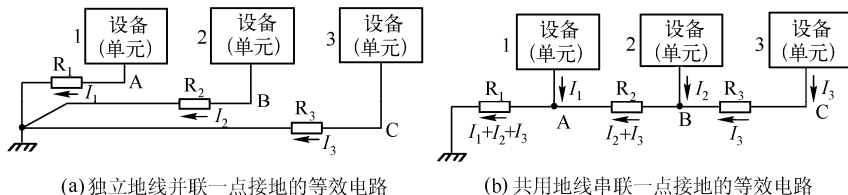


图 9-9 单点接地方式



(a) 独立地线并联一点接地的等效电路

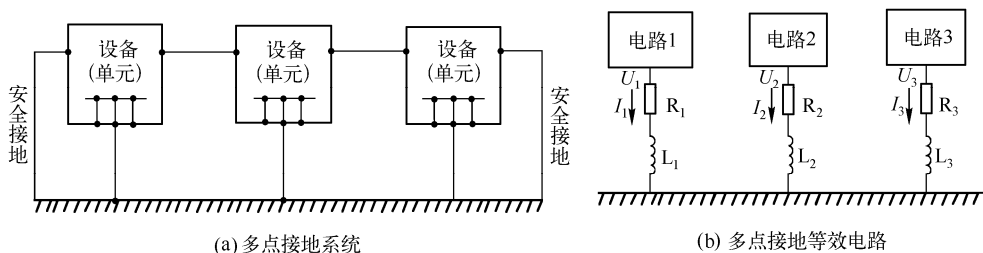
(b) 共用地线串联一点接地的等效电路

图 9-10 单点接地的等效电路

在采用这种接地方式时还必须注意要把最低电平电路放在最靠近接地点的 A 处，以使 B 点及 C 点的电位受影响最小。

## (2) 多点接地方式

多点接地是指设备中各单元电路直接连接到地线上，有多个接地点，如图 9-11 (a) 所示。图中所用的地线分别连至最近的低阻抗地线上，对于高频电路，为了降低地线阻抗，一般均采用多点接地方式。地线系统一般是与机壳相连的扁粗金属导体或机壳本身，其感抗很小。



(a) 多点接地系统

(b) 多点接地等效电路

图 9-11 多点接地及等效电路

多点接地的等效电路如图 9-11 (b) 所示。为了降低电路的地电位，每个电路的地线应尽可能缩短，以便降低地线阻抗。在导体截面相同的情况下，矩形截面的周边较圆形截面的周边长。为了减少电阻，常用矩形截面导体作地线带，通常还在地线上镀银，以提高其表面电导率。

多点接地系统的优点是电路构成比单点接地简单，而且由于接地线短，接地线上可能出现的高频驻波显著减小。但由于多点接地后，设备内部会增加许多地线回路，它们对较低电平的电路会带来不良影响。

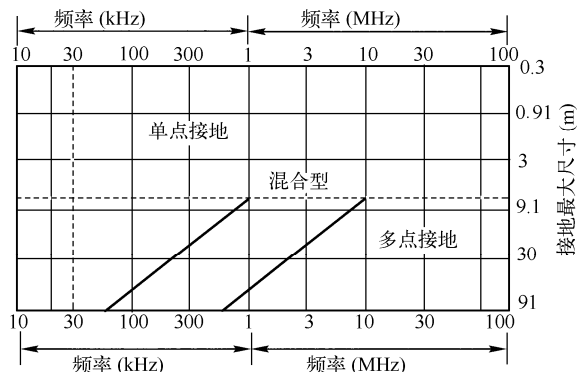


图 9-12 接地方式的选择

综上所述，对于低频（小于 1MHz）和公共接地面尺寸小的情况，要选用单点接地方式。对于高频（大于 10MHz）和公共接地面尺寸大的情况，要选用多点接地方式。介于上述两者之间的情况，频率为 1~10MHz 时，一般可采用混合接地方式，如图 9-12 所示。

### (3) 混合接地方式

在有些用电设备中，既有高频部分又有低频部分。此时应分别对待，低频电路采用单点接地，高频电路需多点接地。这种接地体系称为混合接地系统，如图 9-13 所示。实际用电设备的情况比较复杂，很难通过某一种简单的接地方式解决问题，因此混合接地应用更为普遍。

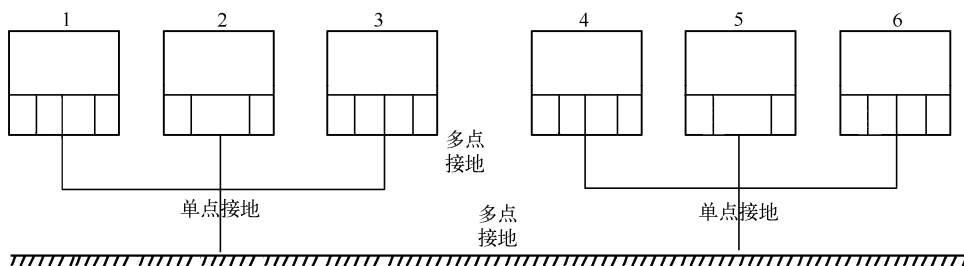


图 9-13 设备的混合接地方式

### (4) 悬浮接地方式

浮地就是将电路或设备的信号接地系统与结构地或其他导电物体相隔离，如图 9-14 所示。图中列举了三个设备，它们内部都各有自己的参考“地”，通过低阻抗导线连接至信号地，但信号地与建筑物结构地及其他导电物体隔离。采用浮地的连接方式可使地中存在的干扰电流不致传导到信号电路。

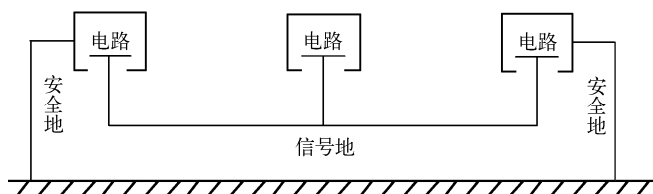


图 9-14 设备的浮地系统

浮地系统的干扰耦合取决于浮地系统和附近导体的隔离程度，在一些大系统中往往很难做



到理想浮地，对于高频更难实现真正的浮地。特别当浮地系统靠近高压线时，可能堆积静电荷形成危害；或引起静电放电，形成干扰电流。电源漏电、雷击都可能在机壳与信号系统之间产生电火花。因此，除了防止结构地线或附近导体有大干扰电流流动影响信号系统外，一般不采用浮地方式。

### 9.1.2.2 电路接地技术

#### 1. 一般单元电路的接地方式

一般单元电路的接地方式有单点接地、多点接地、混合接地和悬浮接地等四种，如图 9-15 所示。

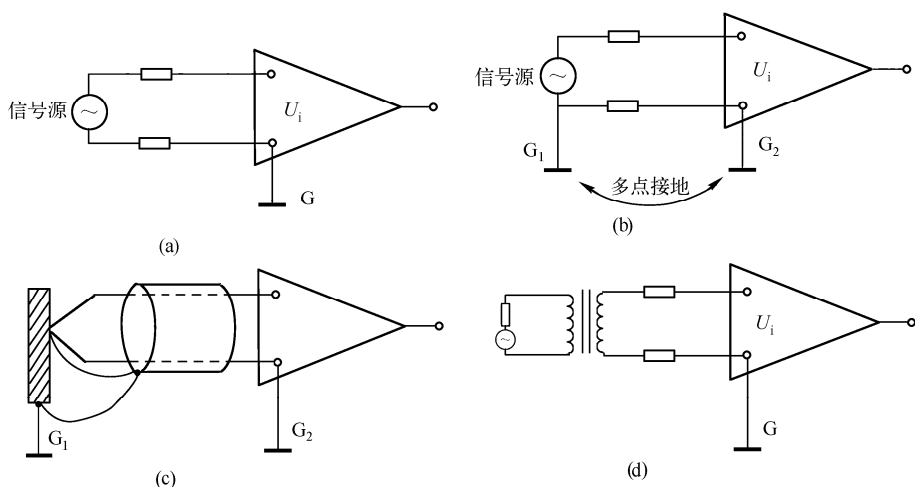


图 9-15 单元电路接地方式

对于一个单元电路来说，应该只有一个接地点，若有多个接地点，由于“地”与“地”之间不可能是理想的零阻抗，因此多点接地往往会引入地阻抗带来的干扰电压。如图 9-15 (b) 中两个接地点的地线系统中有电流流过，因为地阻抗，则  $G_1$ 、 $G_2$  两点的电位不相等，结果在电路的输入回路中，引入了干扰电压，使电路工作发生错误。在多点接地条件下，由于电流引起的干扰可以由图 9-16 所示的等效电路计算来分析。

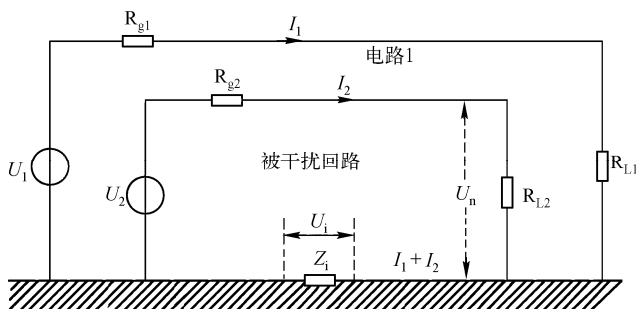


图 9-16 公共地阻抗引起的干扰

#### 2. 多级电路的接地

多级电路是电子电路中广泛应用的典型电路。多级电路的接地应注意避免各级之间通过公共阻抗而形成干扰。例如，高增益放大器往往是由多级放大电路组成，放大倍数又很高，如果接地

不正确,将产生增益失真。由接地不良引起大小随频率变化的寄生反馈,还可能造成高增益放大器的自激振荡,破坏放大器的工作稳定性。因此在多级电路中,特别是对于高增益放大器,必须做到以下几点。

(1) 低频单元电路应该是单点接地。

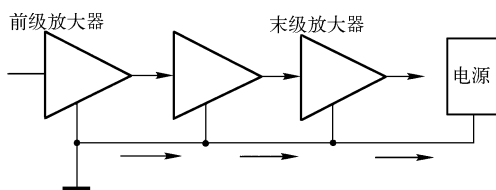


图 9-17 小信号单元流向大信号单元

(2) 各单元电路的接地必须按照一定的顺序连接,即地线中的电流流向必须是由小信号单元流向大信号单元,如图 9-17 所示。

(3) 尽可能避免环形接地回路。在图 9-18 中,多级放大器接地系统包含了一个环形接地回路,在这种情况下,其一,不能避免大信号电路电流进入小信号电路,造成对小信号电路的干扰;其二,地线环容易接受外界磁场的干扰,使放大器不能正常工作。正确的接法应该如图 9-19 所示。

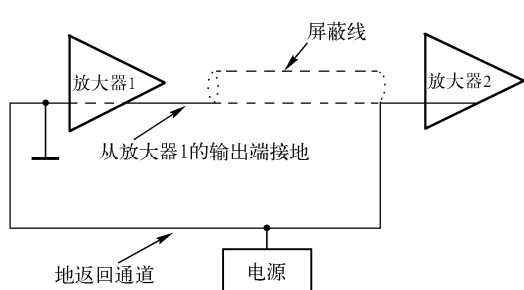


图 9-18 接地系统包含环形接地回路

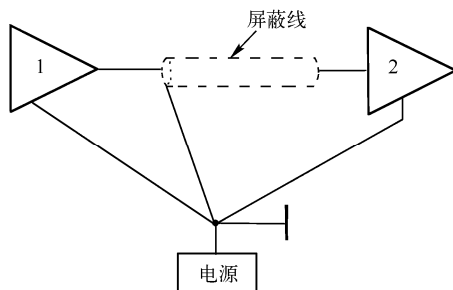


图 9-19 正确的地线接法

(4) 保持屏蔽电流的畅通。图 9-20 给出高增益放大器的正确接地系统,图中前两级放大器由单线返回到总接地线,末级功率放大器电路和高电平信号电路共用一根地线返回线,因为后两者电平都比较高,相互间不易受干扰。

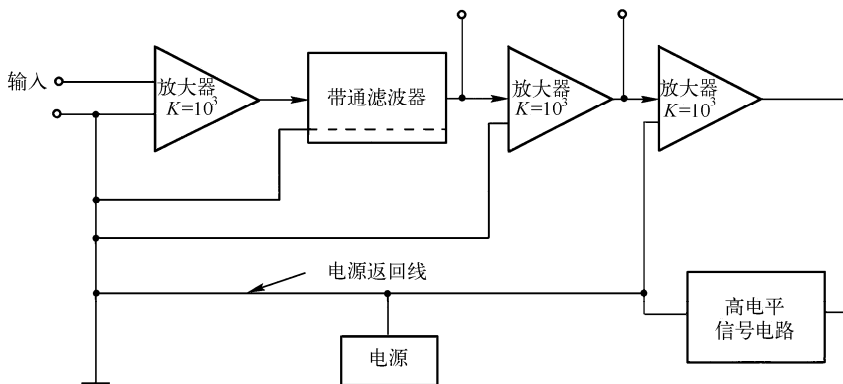


图 9-20 高增益放大器的接地系统

关于地线截面的设计,也要根据电流大小的具体情况而定,特别是对小信号电路,为了减小地阻抗的影响,可以采用截面较大的扁线作为地线。敷设时还应该大、小信号的地线尽可能分开,并不要靠近其他高频电路。

### 3. 高频电路的接地

在高频电路中,导线的电感最为重要,即使在低频时,导线上的电抗也可能比电阻要大。导

线较短、较粗或距接地面较低时，自感量较低。导线的直径通常由导线上的最大允许电压降来确定，而导线电压降与导线电阻和最大电流直接相关。改变导线横截面形状，可改变导线的交流电阻值。矩形横截面导线（俗称扁线）的交流电阻值比圆导线的低，因为每单位横截面上它具有较大的表面积。而且矩形横截面导线的电感也小。所以它是较好的高频导线，也是良好的接地导线，在低频电路中也同样适用。故高频导线以取“短、直、粗”为宜。

前面已经提到，当频率高于 10MHz 时，电路应采用多点接地。多点接地的接地线较短，从而减小了导线的电感  $L$  和电阻  $R$ 。高频电流由于集肤效应而沿导体表面流动，所以多点接地时，要在接地面上镀银，减小地表面阻抗。

在多级高频电路中，由于高频电流线和地线之间的寄生电容耦合，接地面上的感应高频电流大，因此，各单元电路更要按先后次序排列，并且接地线要直线布置，避免地电流的重叠，称作“直尺结构”，如图 9-21 (a) 所示。若接地线按非直线布置（非直尺结构），如图 9-21 (b)，则有地电流的重叠，地电流的流动将在各单元电路之间形成寄生耦合。

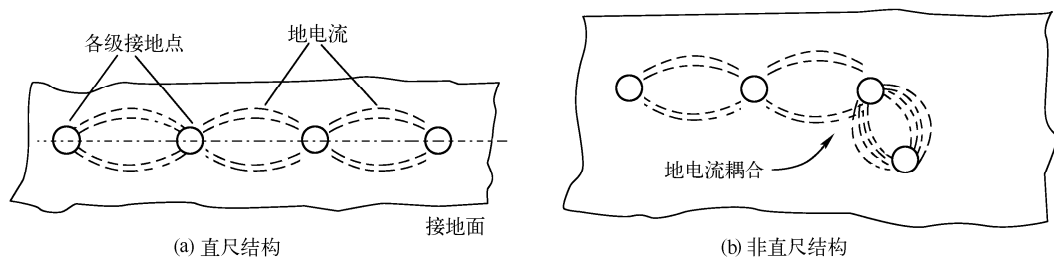


图 9-21 地线的直尺结构和非直尺结构

#### 4. 接地环路去除方法

当电路的两端都接地时很容易构成一个接地闭环回路，如图 9-22 所示，此时外界有磁场干扰就会接收到磁场感应干扰；而在两个接地点之间还可能存在地电位差引起干扰。磁感应电压正比于接地环的面积。因此，为了消除磁感应电压，就应该避免接地环，或尽可能减小接地环面积，此外还采用专门技术措施进一步抑制接地环路干扰。

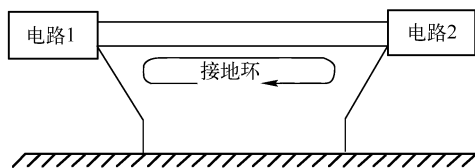


图 9-22 接地闭环回路

##### (1) 浮地

浮地是将电路或设备与公共接地平面或可能引起回路电流的公共导线进行电隔离，这种接地方法的特点是各内部电路的接地面互相隔离，因而可消除各级电路间的接地电位差的干扰。

浮地的效果取决于是否能做到完全的浮地隔离。实际上，要做到完全的隔离，在许多情况下是很困难的。例如，对大的系统要隔离得相当好以保持确实的浮地是难以做到的。而且这种抑制地回路干扰的方法只适用于低频，当频率升高时，分布电容的作用可使多级耦合变压器旁路而起不到隔离作用，因此这种措施不适用于高频。

在实践中，可以在采用浮地的设备与大地之间，接入一个电阻值很大的泄放电阻，以消除静电积累的影响。

##### (2) 隔离变压器

隔离变压器是通过阻隔地回路的形成来抑制地回路干扰的，在图 9-23 (a) 中，电路 1 的输出经变压器耦合到电路 2，而地环路则被变压器所阻隔。隔离变压器对地线中较低频率的干扰具有很好的抑制能力。因为电路中的信号电流只在变压器绕组线中流过，因此可避免对其他电路的干扰。

但是, 变压器绕组之间存在分布电容, 通过此分布电容形成地环路的等效电路如图 9-23 (b) 所示。提高隔离变压器抗干扰能力的有效办法是减小变压器绕组间的分布电容  $C$ 。在变压器之间加以屏蔽就可以有效地减小绕组之间的分布电容, 从而有效地阻隔地环路的干扰。

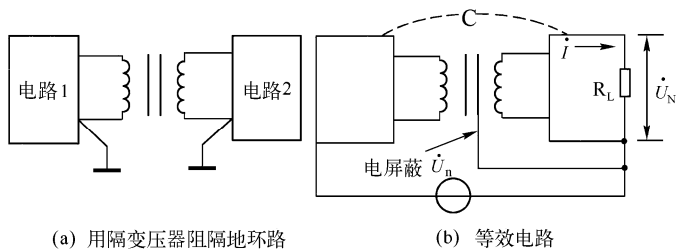


图 9-23 隔离变压器及其应用

### (3) 中和变压器

当传输的信号中有直流分量或很低的频率分量时, 就不能用隔离变压器, 因为隔离变压器使低频信号无法通过, 而要用如图 9-24 (a) 所示的中和变压器或称为纵向扼流圈, 它能通过低频信号, 而对地回路共模干扰电流却呈现相当高的阻抗, 使其受到抑制。

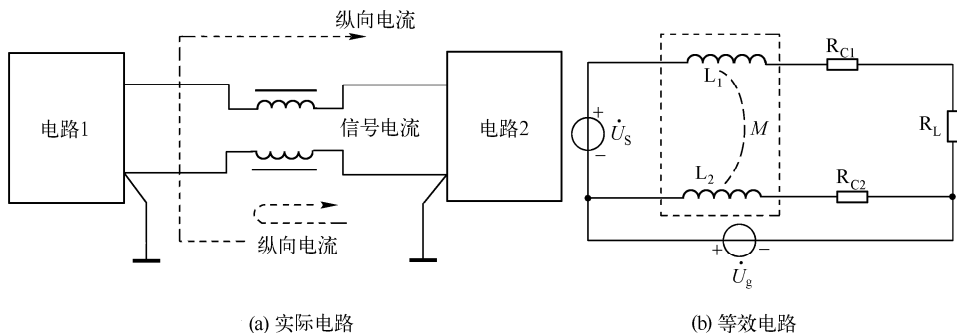


图 9-24 用中和变压器阻隔地环路

中和变压器是由两个绕向相同、匝数相同的绕组所构成的, 一般常用双线并绕而成。信号电流在两个绕组流过的方向相反, 称为差模电流, 产生的磁场相互抵消, 呈现低阻抗。地线中的干扰电流流经两个绕组的方向相同, 称为共模电流, 产生的磁场同向相加。因此两个绕组对回路干扰电流呈现高阻抗, 可抑制地环路干扰。

### (4) 光电耦合器

切断两电路之间地环路的另一种方法是采用光电耦合器, 对数字电路特别适用。在模拟电路中, 由于发光二极管电流与光强不是线性, 在传输模拟信号时会产生较大的非线性失真, 故光电耦合器的应用受到一定限制。

#### 9.1.2.3 信号电缆屏蔽层的接地

屏蔽电缆抑制干扰的能力除与其屏蔽层本身的质量有关外, 还与屏蔽层的接地方法密切相关。即使同一种电缆, 由于传输信号的频率不同, 屏蔽层也应采用不同的方法接地。以同轴电缆为例, 在传输高频信号时, 屏蔽层应采用两点或多点接地; 传输低频信号时, 屏蔽层应单点接地。此外屏蔽层接地点的选择对抑制干扰的能力亦有较大的影响。在工程上必须根据电线具体情况具体分析, 才能确定屏蔽层的合理接地方案。

### 1. 低频时电线屏蔽层的接地

在低频电路中用非铁磁性材料制成的单芯电缆屏蔽层，虽然其本身抑制磁场干扰的能力很小，然而通过正确的接地，仍可较好地抑制磁场干扰。当同轴电缆传输信号的频率远大于截止频率时，在屏蔽层两端接地的情况下，信号返回电流仍然几乎全部经过屏蔽层，流入地线的很少。由于芯线电流与屏蔽层中电流方向相反、大小相等，因此往返电流在屏蔽层外的漏磁场就相互抵消。但在低频时信号返回电流几乎全部从地线流过，此时屏蔽层对磁场的抑制能力就很差。

传输低电平信号的同轴电缆，其屏蔽层按上述原则接地，还可将其地环路面积压缩到最低限度。对于两端接地的电缆，若两接地点存在电位差，屏蔽层中的噪声电流会加到电缆负载端造成干扰。

#### (1) 屏蔽层一点接地

对于单点接地的低频电路，屏蔽层应该采用一点接地法。但是接地点的位置选择仍需作具体分析确定。图 9-25 为一个“信号源-电缆-放大器”组成的单点接地系统，图中放大器一点接地。电缆屏蔽层可经过标有 A、B、C、D 虚线的四条路径中任意一条而接地。经 C 线接地是理想的连接方式，此种接地为屏蔽电缆层的最佳接地点。

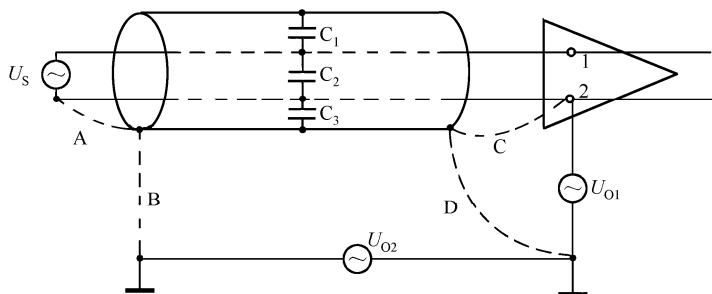


图 9-25 电缆屏蔽层接地点分析

“信号源-电缆-放大器”电路如果为信号源一点接地，而放大器不接地，如图 9-26 所示。则经 A 线接地为最佳方案。屏蔽层在 C 点接地时，屏蔽层中的噪声电流在芯线阻抗上产生的噪声电压将与信号电压串联后加到下一级电路，C 点接地不合适。屏蔽层在 B、D 两点接地，干扰电压会加到放大器输入端，这两点接地也不合适。

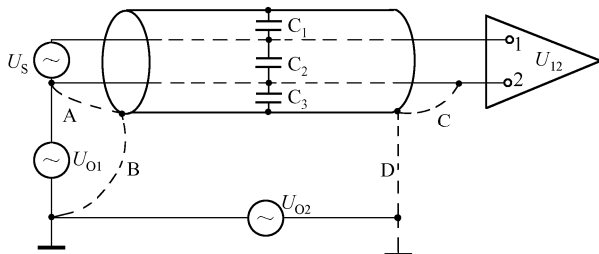


图 9-26 信号源一点接地而放大器不接地

#### (2) 屏蔽层两点接地

对于两点接地的低频电路的信号电缆屏蔽层应采用两点接地法。

### 2. 高频时电线屏蔽层的接地

当频率高于 10MHz 或电缆长度超过波长的 1/20 时，由于集肤效应的作用，使信号电流沿

同轴电缆芯线的外表面流动, 返回电流则集中在同轴电缆屏蔽层的内表面流动。由于干扰所产生的噪声电流只在屏蔽层外表面通过, 因此屏蔽层通常采用多点接地, 以保证其外表面有最低的地电位。一般是在电缆屏蔽层两端接地, 若电缆长度接近或大于波长, 应每隔  $(0.05 \sim 0.1) \lambda$  的间隔接地一次, 以免电缆屏蔽层上的高电平的噪声电压通过分布电容耦合到电缆芯线上。

### 3. 视频混合接地

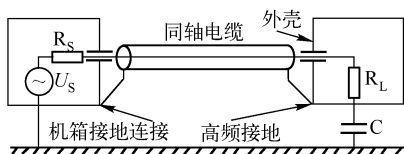


图 9-27 视频回路混合接地方式

在覆盖低频到高频的宽频带电路中, 低频时要求同轴电缆屏蔽层单点接地, 传输高频信号又要求电缆屏蔽层多点接地, 对接地要求出现矛盾。图 9-27 所示的图像放大器电路接地方式就为解决这类矛盾提供了一个实例。该电路工作频率从音频直到高频, 所以图中主放大器的外壳直接接地, 负载端的外壳则通过电容 (有时利用分布电容) 接地。同轴电缆的屏蔽层经同轴连接器与两外壳相连接。低频时, 负载端的外壳对地呈高阻抗, 可视作不接地, 整机只有主放大器外壳一点接地。但到高频时, 负载端外壳对地电容  $C$  构成高频接地, 实现视频电路的高频两点接地。

### 4. 低电平电路屏蔽层的接地

图 9-28 所示为传感器与前置放大器之间采用双绞线连接, 外面采用双层屏蔽的低电平电路。双绞线可以减小磁场干扰; 内层屏蔽层单点接地, 外层屏蔽层是多点接地。由于外层屏蔽层上有干扰电流, 因此必然形成电位差, 外层屏蔽层上的电位对内层屏蔽层上也形成电位差, 但由于内层屏蔽层是单点接地, 不会形成干扰电流, 这样便保证里面的传输线上不受外界电磁场的干扰。

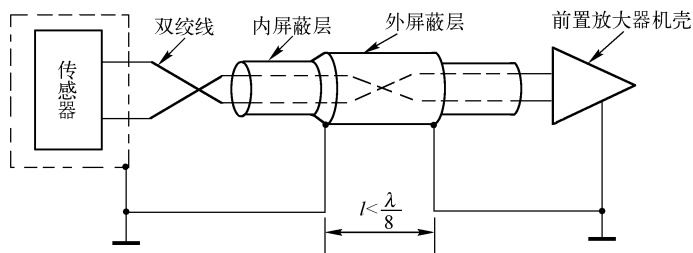


图 9-28 低电平电路屏蔽层的接地

采用热电偶测量温度, 接地方式正确与否将直接影响测量结果的精度。图 9-29 (a) 是热电偶的测温装置电路。由于放大器信号输入地线和输出地线构成接地环, 使数据采集系统输入信号比热电偶的输出信号多了一个误差信号, 造成测量不准确。

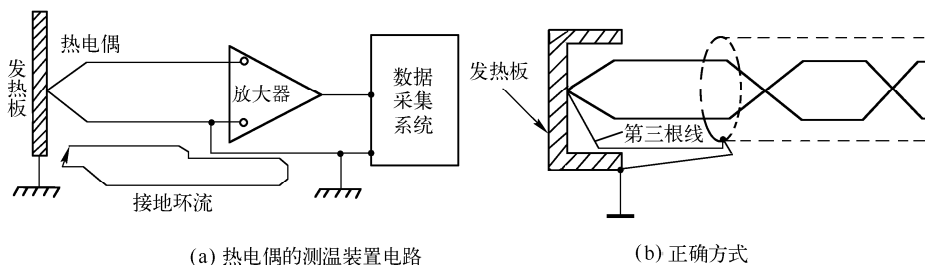


图 9-29 热电偶测温装置的接地

图 9-29 (b) 中采用屏蔽的双绞线和第三根接线（发热板-屏蔽层），没有公共地阻抗的共模电压，可以免除共模电压通过引线电阻不平衡引起的误差，这里用屏蔽层来代替金属管而且屏蔽层连接到热源（发热板）。实验证明，第三根线是需要的，该线的材料应当是热电偶材料中的一种。它的作用是把信号（热源）的接地点与屏蔽层的接地点连在一点，因而消除了前一种存在共模电压的缺点。

#### 9.1.2.4 信号电路屏蔽罩的接地

为防止多级小信号放大器和高增益放大器自激，通常应对它们进行屏蔽。其屏蔽效能除了与屏蔽罩自身结构质量有关外，接地方式也是一个很重要的因素。

电子电路板和组件通常都装在一个金属盒内，一方面作为安装固定的构件，形成具有一定机械强度的保护罩；另一方面起屏蔽保护作用，使电路不受电磁辐射干扰的影响。例如，当印制电路板上装有射频变压器时，常要加上射频变压器屏蔽罩，以防止电磁干扰与印制电路相耦合。必须将屏蔽罩直接与机壳相连，如图 9-30 所示，图中屏蔽罩不能与印制电路板上的任何接地线相连接，否则干扰将进入到印制板的电路中去，破坏电路工作。

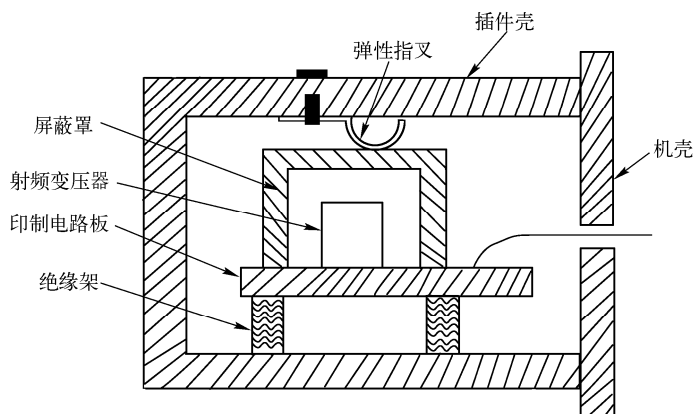


图 9-30 印制电路屏蔽罩接地

##### (1) 单层屏蔽罩的接地

图 9-31 (a) 中信号电路屏蔽盒没有接地。在信号电路与屏蔽盒之间会存在寄生电容，使信号电路输出线到输入线之间引入一条反馈通道，会使放大器产生自激。

图 9-31 (c) 表示屏蔽盒在信号电路始端接地，虽然把寄生电容  $C_{25}$  短路，但是放大器输出端的信号电流经  $C_{35}$  向输入端流动时，会在输入端地线电阻上产生寄生电压，形成反馈，破坏放大器前级的正常工作是不正确的。

图 9-31 (d) 为屏蔽罩在放大器的输入端和输出端均接地，这样屏蔽罩成了放大器接地环路的通道之一，结果在放大器输入端引入了公共地线阻抗干扰和地环路干扰。因此这种接地也是不正确的。

如果将屏蔽盒在信号地线末端一点接地，如图 9-31 (b) 所示，这时  $C_{25}$  被短路，就可以消除寄生电容，既可以消除后级电路对前级的干扰，又可以避免接地环产生的感应磁干扰。

从以上分析可知：放大器屏蔽罩与地线一点直接连接。其接地点选在输出端地线上可以消除输出端对输入端的干扰，又可以避免地环路产生的磁场干扰。

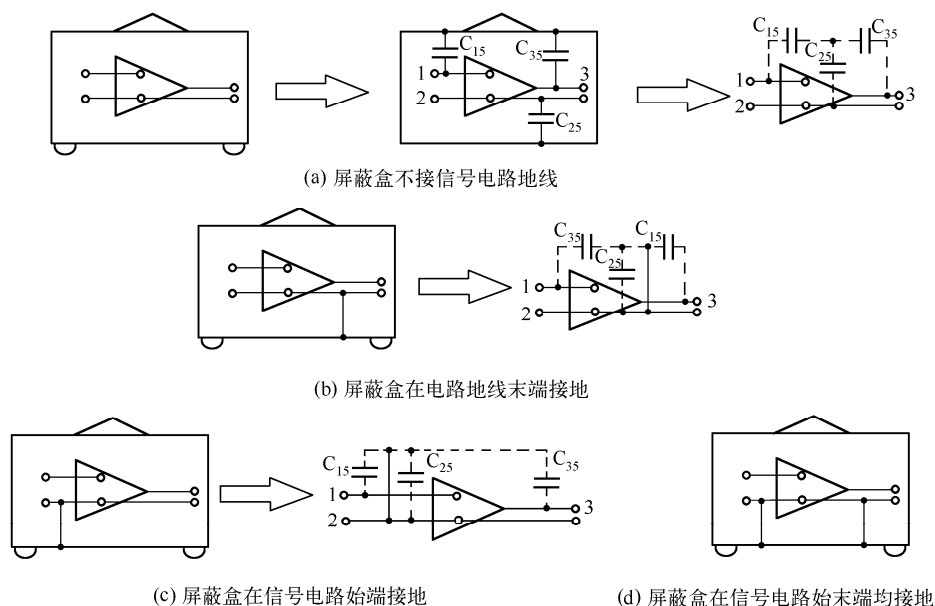


图 9-31 屏蔽盒体的接地

## (2) 双层屏蔽罩的接地

为了提高某些弱电平高、灵敏度信号电路的工作稳定性,有时需采用双层屏蔽。选择这类屏蔽层的接地位置时,应仔细考虑地电流的影响。在图 9-32 (a) 中,接地点选择不当,内、外屏蔽罩与信号电路的输入端地线相连,导致两屏蔽罩间的连接线以及外屏蔽罩的接地点都远离输出端。由于集肤效应,高频电流仅沿着屏蔽罩表面流动,构成面积很大的地环路;加之地电流的路径长,接地阻抗增加,严重地影响屏蔽罩的屏蔽效能。

图 9-32 (b) 为正确的接地方法,它把内屏蔽罩与信号电路输出端地线相连。两屏蔽罩间的连接以及外屏蔽罩的接地都在信号电路的输出端,回流电流的路径缩短,地环路面积减小,屏蔽效能最好。

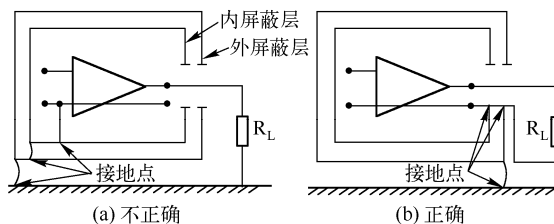


图 9-32 双层屏蔽罩的接地

### 9.1.2.5 电缆引入屏蔽盒的接地

屏蔽电缆引入屏蔽盒时,若电缆屏蔽层接地方法不当,就会把外界干扰引入屏蔽盒内,影响屏蔽效能。如采用图 9-33 (a) 所示方法,电缆屏蔽层在屏蔽盒内部接地,绕着环路流通的电流,在屏蔽盒内造成干扰,从而使屏蔽盒的屏蔽效能降低。如将电缆尾部的屏蔽层编成辫线后在屏蔽盒入口处外侧接地,剥去屏蔽层部分的电缆芯线仍会将干扰信号引入屏蔽盒内。图 9-33 (b) 是屏蔽电缆引入屏蔽盒的正确方法:把屏蔽层环绕芯线的整个一周与屏蔽盒实现良好的电接触,这



可通过压环或电缆连接器来实现。电缆连接器在屏蔽盒上安装时为保证良好的电接触,安装之前应清除接触面上的油漆、油污和氧化层等不导电物质。

在两个具有屏蔽机箱的设备之间采用屏蔽电缆传输信号时,电缆屏蔽层与两设备的屏蔽机箱在电气上应保持连续,构成一个完整的屏蔽体,如图 9-34 所示。一般在电缆与屏蔽箱体入口处采用相应规格的电缆连接器来实现连续屏蔽。

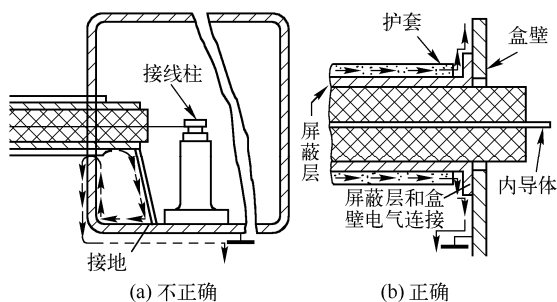


图 9-33 屏蔽电缆引入屏蔽盒的方法

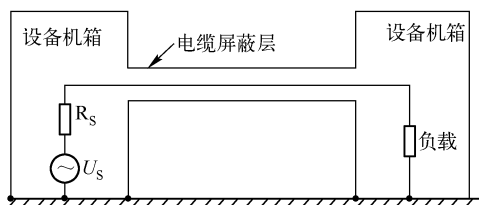


图 9-34 屏蔽机箱与互连电缆的连续屏蔽

### 9.1.2.6 多芯插座的接地

电子设备内电路的结构单元(印制电路板、电路插件等)中有电源馈线、地线、信号线、控制线等,它们是通过多芯插座与其他单元作电气连接,组成一个完整的设备。

对于放大电路的多芯插座来说,为减小高电平强信号输出线对低电平弱信号输入线的耦合,应将输出线分配在插座的一侧,输入线分配在另一侧,使两者远离。地线安排在两信号线的内侧,可减小信号线引脚间的分布电容,起辅助屏蔽作用。电源馈线对交流信号呈低电位,它在多线插座上的分配原则与地线相同。

所选用的多线插座引线脚的数量通常多于印制电路板所需外连线的数量。地线、电源线及大电流的信号线等,每一线都可并联占用多线插座的两个或多个引线脚,以减小接触电阻,提高连接的可靠性。图 9-35 所示为一个多芯插座引线脚的分配情况,其中,高、低电平线分布在两侧,中间用地线隔开。

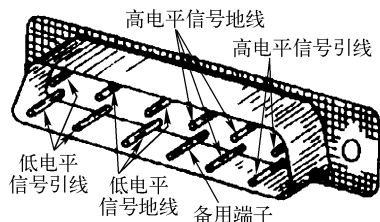


图 9-35 多芯插座的配线举例

### 9.1.3 特殊电子设备的接地

#### 9.1.3.1 大型复杂电子设备的接地

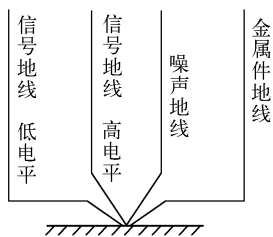


图 9-36 地线的分组

大型设备中往往包含多种电子电路和各种电动机、电器等电气组件,它们的地线一般应如图 9-36 所示分组敷设,分为信号地线、噪声地线和金属件地线等。这是解决地线干扰行的有效的方法。插箱内起屏蔽作用的插入单元外壳(装有印制电路板的屏蔽盒)与插箱绝缘,它通过印制电路板的多芯插头座接入信号地线。每个插箱金属外壳与机架之间仅有一点(设备地)相接;整个设备内各类地线汇集于一点接地。

复杂电子设备的地线系统可按下述步骤设计:

- (1) 分析设备内各类电气部件的主要干扰特性和类型。
- (2) 搞清楚设备内各电路单元的工作电平、信号种类和抗干扰能力。
- (3) 按电气部件和电路特性分类划组, 确定相应的地线种类和数量。
- (4) 画出总体布局图, 排出地线系统图, 拟订结构实施方案。

#### 1. 机箱的接地

容易使机箱通电后产生故障, 除了虚焊外, 往往就是地线的干扰。因此, 接好地是最重要、最有效的减少干扰的措施之一。在整机装焊中, 要求采用较粗的裸镀银线做主地线。所谓主地线是指这一个机箱中将所有的器件需接地的端子连接到一起的导线(注意一定不能形成闭合回路)。这种镀银线的电阻数值约每米若干毫欧, 但当地线与其他导体相距较远时, 地线的电感约为  $0.8\text{mH/m}$ 。

##### (1) 机箱中常见的地

① 信号地。设备内用于传输数据、定时、控制信号的直流地回路称为设备的信号地。一般都是些信号电路、放大器前级电路、数字电路等的接地。注意这些接地点在电气上与机壳绝缘。

② 功率地。与信号地的区别主要在于, 通常功率地指高电平电路的接地点, 如继电器绕组、伺服电动机绕组、白炽指示灯、大功率输出装置、电源等的接地点。

③ 机械地。对电子设备进行电磁屏蔽及对人员起安全保护等作用的机箱金属构件的接地称为机械地。设备必须提供机壳接地的连接点, 其目的是为了屏蔽壳体内电子电路, 在提高设备的电磁兼容能力的同时, 也保证人的安全。

④ 基准地。信号地、功率地、机械地等总的汇入点称为基准地。一般由基准地与大地相连(即信号地、功率地、机械地不单独与大地相连)。

##### (2) 地线的处理

在整机装焊中, 首先处理主地线, 用直径为  $1.0\text{mm}$  镀银线将所有需接地的器件端子以最近连接距离将其连接起来; 一定要注意千万不要将其头尾连接以形成闭合回路! 其次用直径为  $0.8\text{mm}$  镀银线将整机中各插座内的“地”以最近距离连到主地线上。

在整机的接地技术中原则上应遵循以下要点:

- 接地线尽可能直、短、粗。
- 接大地底板、地线的电阻尽量小, 其焊点要有良好的电接触, 阻抗尽量小。
- 公共参考地选在大负载电流电路附近。
- 尽量用永久式、直接式接地。
- 大突变电流电路和低电平信号的地应彼此隔离, 并同其他地回路隔离。
- 尽量用同类金属接地, 不同类金属接地时, 要选其电化学序号尽量靠近的金属, 或采用过渡方式。
- 接地面要清洁、光滑, 无绝缘物, 要防潮、防腐蚀。
- 信号线、信号线屏蔽体(通常说的屏蔽导线的屏蔽皮)、电源的地应彼此隔离, 只准有一个公共点。
- 在数字电路的机箱中, 信号地、模拟地应尽量远离接地, 例如, 同一个插座上既有信号地, 又有模拟地, 这时不要将其焊到同一点的主地上, 应将它们分开焊在插座两边的主地线上。

#### 2. 机柜的接地

将机柜的一些接地方法简要介绍如下。

(1) 常规的三层次接地系统, 如图 9-37 所示。

(2) 机柜中各机箱的地和机柜的地连接, 应该把每个机箱的信号地、功率地分别引出到设备机壳外表面的连接点上, 该连接点在电气上与机壳绝缘, 而机壳可以就近与机柜安装的大地相接, 或者接到机柜中分支电缆的金属皮上。

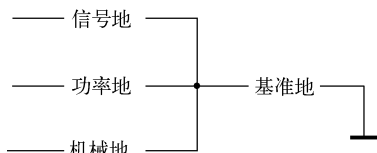


图 9-37 三层次接地系统

无论是哪种类型的机柜, 在机柜的两侧或一侧, 在铺设低频电缆前, 都应钳装好“地带”(铜镀银约 10~20mm 宽), 这便是机柜的主地线。给机箱的地、电缆的地以形成通路。注意, 机柜的这个主地一定要和装在机柜脚上减振器的地线相通; 在装减振器时, 要装一根引出地带或地线, 这根引出地带或地线是接至电子设备的安装场地的。

(3) 一个机柜内有多个分机的接地方法, 如图 9-38 所示。

(4) 如果一个电子设备有多个机柜组成, 它们要求有同一信号的地电平, 并且这些机柜又相邻, 这时应把这样的多机柜看成是同一个单独的设备, 其信号地仅通过一个公共点与支接地电缆连接, 如图 9-39 所示。

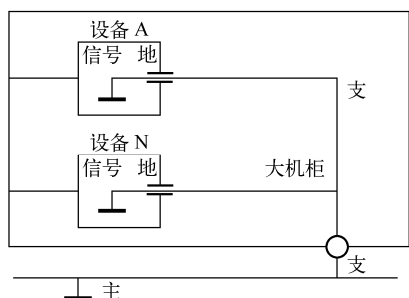


图 9-38 一机柜多分机接地方法示意图

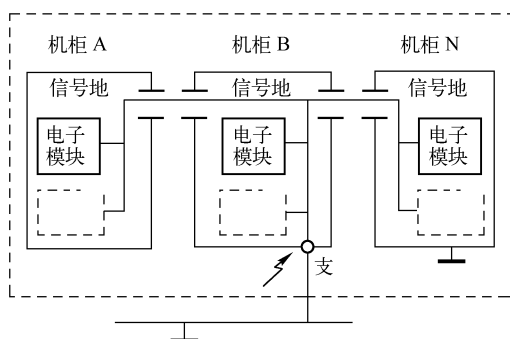


图 9-39 多机柜接地系统示意图

### 9.1.3.2 运动系统的接地

飞机、轮船、火车、汽车、飞船、导弹等物体都是以一定速度与陆地作相对运动的移动系统, 它内部又装备着密集而先进的电子、电气设备。为了保证系统内部人员、设备的安全和系统的电磁兼容性, 必须设置专门的接地系统。现以飞机为典型范例分析接地系统的特殊问题。

#### 1. 飞机的接地面

飞机(或宇宙飞船)的“接地面”是采用是浮接地系统, 因为它们与大地做相对运动, 不可能接大地。在这种接地系统中, 所有的电子、电气设备或系统只有相对的零电位, 通常以机壳(或机框)作为地参考点。在飞机上需要提供几个系统接地点, 将小信号电路地、大信号电路地以及干扰源噪声地等分别设置, 然后再连接到一个接地体上, 以避免相互干扰。

由于飞机不接大地, 不利于防止外界环境的电磁干扰, 如雷击、静电等。因此, 飞机的基准地应有以下考虑:

(1) 设备壳体应具有很好的屏蔽作用, 并设有壳体接地装置。凡是能产生电磁能或对电磁场敏感的电子、电气设备或部件, 均使其外壳与飞机基本结构搭接, 形成连续的低阻通路。

(2) 设备内部的电路系统应从电气上与设备壳体绝缘。并按分组接地的原则, 相应建立分基准接地点, 然后再接到飞机的基准接地面上。

(3) 直流系统的负线与交流系统的零线应采用尽可能短的线连接, 然后接到所在系统基准地点上。

(4) 天线系统在天线安装座处接地。在无屏蔽的发射天线附近, 任何线性尺寸大于 300mm 的导体, 均应搭接到基本结构上。该搭接最好是直接接线, 如果需要用搭接线时, 则搭接线应短。

### 2. 飞机射频接地面

由于飞机是悬浮接地系统, 所以接地面建立在机壳(或机框架)的金属构件上。蒙皮上的口盖、舱盖、检修门等, 均应搭接到基本结构上, 在电气上提供一个低阻通路。因此飞机的蒙皮应设计成均匀的低阻抗通路。

### 3. 飞机避雷接地

飞机遭到雷击, 一种是直接雷击, 另一种是感应雷击。直接雷击破坏性甚大, 可能造成机毁人亡的事故; 感应雷击是飞机接近带有大量电荷的云时, 雷云将对飞机(或设备)壳体感应产生大量的电荷, 形成较高的电位, 可能发生绝缘介质击穿烧毁电子设备, 也可能造成不连续的两点之间放电产生火花, 若发生在易燃、易爆危险区域则会引起火灾。因此, 飞机的整个壳体和基本结构应有连续的低阻通路, 以便能让强大的雷击瞬间电流流过, 同时, 在电流流过的通路上不应产生过热的部位和缝隙之间发生电火花。搭接就是保证这个续低阻通路的技术措施。

### 4. 飞机静电接地

飞机在飞行中, 会产生大量的静电荷附着在飞机的尖端(凸出)部位。虽然在飞机的适当部位装了一定数量的放电器, 能使大量的沉积静电泄放掉, 但总会有一部分剩余的电荷, 它所形成的电位比大地的电位高许多倍; 因此飞机在着陆时要有接大地的装置, 如接地刷, 把飞机上剩余的静电迅速放掉。飞机在地面停放或加油时, 都应与大地连接保持同电位, 防止静电起火。

## 9.2 搭 接 技 术

### 9.2.1 搭接的概念与分类

#### 9.2.1.1 搭接的概念

搭接是指两个金属物体之间通过机械或化学方法实现结构连接, 以建立稳定的低阻抗电气通路的工艺过程。任何电气、电子系统中, 无论是一个小部件或整套设施都需要在金属体之间进行相互搭接, 以便提供电源和信号的回路。搭接技术应用于各种设备的金属机箱之间、设备机箱到接地平面之间、信号回路到地线和电缆屏蔽层到地线之间, 也应用于接地平面与连接大地的地网之间、屏蔽体与大地之间。在汽车, 飞机和舰船上搭接应用十分普遍。它可以提供安全保护、雷电防护和静电泄放通路。

搭接是抑制电磁干扰的技术措施之一。例如, 电缆连接器与设备壳体的搭接能使电缆屏蔽获得最佳效果。搭接不良或不适当, 不仅直接降低设备或系统的抗雷电放电、抗静电和抗信号噪声干扰的能力, 直接影响系统和人身的安全, 而且还影响其他抑制电磁干扰技术措施的实施效果, 如滤波、屏蔽和接地等。如果没有搭接措施, 连接器屏蔽效能将大为降低, 使全部电缆的屏蔽防护功亏一篑。因此, 搭接对于保持电缆屏蔽的完善性和维持电缆的低损耗传输特性是必不可少的。

电源滤波器的壳体对设备外壳或机架地的连接良好与否, 直接影响滤波器的性能。图 9-40 所示滤波器是一个

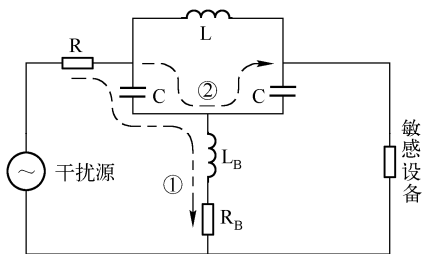


图 9-40 滤波器的不良搭接

低通滤波器，其用途是滤除设备电源线中高频干扰分量。在高频情况下，旁路电容器的电抗呈低阻抗。出现在电源线路上的干扰信号沿着通路被旁路到地，因此干扰信号不会到达负载，从而达到了滤波目的。但是，如果搭接不良，那么干扰电流将流过通路②而到达负载，因此滤波器的效率就会降低。

在电流通路上若某一个搭接点没有牢固地连接，或由于振动而使连接点产生松动，这种连接点会起到间歇式触点的作用。即使通过直流电流或工频交流电流，在此所产生的火花亦可能会形成频率高达几百兆赫的干扰。

又如，在雷电保护网络中，一个雷击放电的很大电流可能在不良的搭接点上产生几千伏压降。由此产生的电弧放电可能造成火灾或引起爆炸等危害。

综上所述，搭接的目的是：

- (1) 防止雷电放电的危害，保护设备和人身安全。
- (2) 建立故障电流的回流通路，建立信号电流的均匀而稳定的通路。
- (3) 降低机箱和系统壳体上的射频感应电动势，防止静电电荷的积聚。
- (4) 防止电源突然与地短路发生电击危险，保护人身安全。

### 9.2.1.2 搭接的分类

#### 1. 根据搭接的方法分类

根据搭接的方法，可将搭接分为永久性搭接和半永久性搭接两种。永久性搭接是利用钎接、熔焊、钎焊、压接等工艺方法，将两种金属物体保持固定的连接。它在装置的全寿命期内应保持固定的安装位置，不要求拆卸进行检查、维修或作系统的更改。永久性搭接在预定的寿命期内应具有稳定的低阻抗电气性能。

半永久性搭接是利用螺栓、螺钉、夹具、销键紧固装置等辅助器件使两种金属物体紧密连接的方法。为了进行系统更改、检查测量电阻和噪声、维修和替换部件等需要，应采用半永久性搭接，以便降低成本。

#### 2. 根据搭接的形式分类

从搭接的形式上可分为直接搭接和间接搭接。

由于搭接方式有直接搭接和间接搭接之分，这两种方式从结构、材料和工艺上都有较大差异，因此它们的搭接机理是不一样的，需要分别给予分析。

##### (1) 直接搭接

直接搭接，是在互连的物体之间不使用辅助导体而直接由两种物体特定部位表面接触，建立一条导电良好的电气通路。一般通过焊接工艺在接合处建立起一种熔接的金属搭接，或者利用螺栓等辅助器具在配接表面之间保持着强大的压力来获得电气连续性。如电源配电母线条带的拼接、避雷装置引下导体与大地电极的连接、设备面板与机架间的配接等都是直接搭接的例子。

直接搭接的常见形式有对接和搭接两种，如图 9-41 所示。

由于金属表面并不是绝对光滑的，因此将两件这样的表面放在一起接触时，它们只在峰顶（被称为粗糙点）上接触。这样一来，实际供电流流动的接触面积，就比金属接触的视在面积小得多。

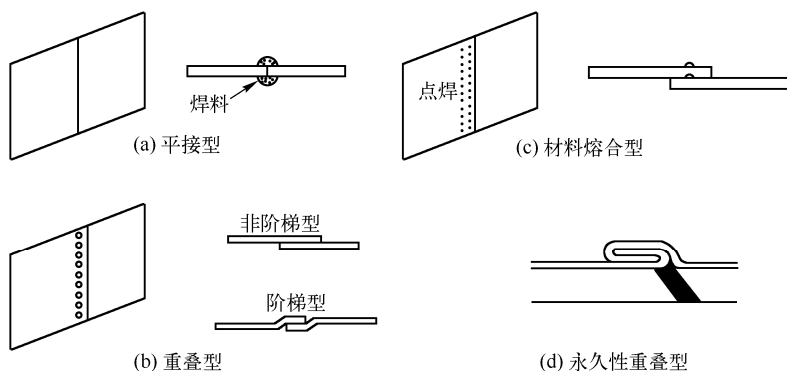


图 9-41 常见搭接形式

图 9-42 示出了连接表面的实际接触面积的放大侧视图。理论上，两个无限硬的表面只能在三个粗糙点上接触。但是，一般在高压之下由于弹性

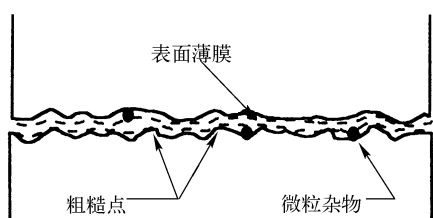


图 9-42 在连接导体之间接触表面的放大

变形和可塑性，会使一些被挤压的粗糙点变形而形成接触。因此，电流仅在已被挤压变形而建立了真正金属接触的那些粗糙点上通过两个表面，电气接触的实际面积等于相接触的各个粗糙点面积的总和，它可能只是视在（总表面）接触面积的百万分之一。

直接搭接的质量和可靠性取决于搭接导体的接触电阻，必须在长期使用中保持很低的电阻值才能提供有效的电气通路。直接搭接连接电阻的大小与导体连接的面积、接触压力、表面杂质和表面硬度等因素有关。

为了减小直接搭接的连接电阻采用增大连接面积的方法时，同时必采用紧固螺栓来使接触面获得较大的压强，使连接电阻不再随接触面压强而变化。这样就可以用增大连接面积来减小连接电阻。工程上总是希望连接的配接表面面积尽量地大，相应增大表面之间金属真正接触点的总数。除了具有减小连接电阻、获得较大机械强度的明显优点之外，大连接面积还可以增加散热面积，使热量容易散发。

实际的连接表面上会出现表面薄膜。例如，铁和铝等较为活泼的金属，会很快氧化而形成表面薄膜；金、银和镍等金属则受氧化膜的影响较小；虽然银并不会产生严重氧化，但会很快形成银的硫化物。如果表面薄膜比接触材料软得多的话，薄膜在粗糙点之间被挤破，从而建立一种准金属接触。但是，较硬的薄膜可能经受得住所加的全部或部分压强，从而减少或限制导电的接触面积。如果这种硬薄膜出现在连接的表面上时，那么就必须在连接部件接合之前通过热的、机械的或化学的方法把薄膜除掉。如果在连接时采用金属流动工艺，也必须把这些表面薄膜除掉或穿透，以便能建立一种匀称的金属通路。

连接表面的硬度，同样会影响接触电阻。在给定的负荷下，较软的金属的粗糙点会产生较大的可塑变形，并建立较大的金属接触面。同样，在软材料和硬材料进行相互连接时，较软的材料必然会适应硬材料的表面形状，并且所产生的接触电阻会比两种硬材料所形成的接触电阻更低。

## (2) 间接搭接

在实际工程中，有许多场合需要使两种互连的物体在空间位置上必须分离或者保持相对的运动，显然这就妨碍了直接搭接方式的实现。此时就需要采用搭接带（搭接片）或其他辅助导体将两个物体连接起来。这种连接方式称为间接搭接。

由于间接搭接需要采用搭接带或搭接条等辅助导体连接两种金属物体，因此间接搭接的连接电阻

等于搭接带（条）两端的连接电阻之和与搭接带（条）的电阻相加。搭接带的电感是不可忽略的，即使是在频率相当低时，感抗也比电阻大得多，因此应尽量选择长宽比小于5的扁平搭接带（条）。

## 9.2.2 搭接设计和加工

### 9.2.2.1 搭接的结构设计

搭接设计，首先应结合系统和设备的整体结构，综合考虑屏蔽、接地的需要。设计搭接点的布局和配置，必须达到防止各种放电、保护人身和设备安全的目的；其次应满足连接电阻的要求。影响搭接点连接电阻的主要因素有搭接结构、金属表面的处理状况、连接加工方法、环境条件和通过接头的电流频率和幅值等。

#### 1. 搭接设计的一般原则

(1) 搭接良好的关键在确保金属表面之间紧密接触。被搭接的接触表面应该光滑、清洁，不留非导电物质。紧固措施应有足够的压紧力，使搭接点在受到冲击振动和扭曲时搭接电阻不增加。

(2) 对有较大相对运动的对象，搭接条要有一定的抗振性能和较好的柔性，以延长其工作寿命。

(3) 要确保搭接条或搭接片能够承受可能出现的最大电流，以免搭接条过载熔断造成更大危害。

(4) 搭接处应采用防潮和防电化学腐蚀的保护措施，以确保搭接点的电气稳定性。选择搭配时，应采用电位序接近的金属结合在一起。当搭接的两种金属的电位序相差较远时，可以采用第三种金属过渡的方法，例如，光泽照人的不锈钢面板和铝型材框架连接时，为了防止对铝架的腐蚀，可在两种金属之间加入铁的垫圈，这样可以减小接触面之间的电位序差距，即使有些腐蚀，也是垫圈受损，于是就保护了铝框架的强度、稳定性和面板的导电接地安全。

(5) 搭接条应尽量短、宽（粗）、直，以满足搭接的低电阻和小电感要求。

(6) 为便于若干台电子设备互连组成分系统乃至系统，单台设备分类地线的单点接地点的汇流排结构应做得分、合方便；当多台设备互连协同工作时，每台设备的原有单点接地点可能先要分解，根据需要将不同设备的同类地线互连，最后才将非同类地线在整个分系统或系统内的合适位置作单点接地处理。

#### 2. 搭接条（片）的形式和选材

搭接条最好用导电性能好的扁平薄板料制造。为减小搭接条的射频阻抗，推荐长宽比不超过5:1。图9-43为三种搭接条（片）的射频阻抗与频率的关系。当搭接条长度可与信号波长比拟时，搭接条将成为射频能量的辐射器，这种现象应予以避免。

搭接效能是被搭接对象在采用搭接条前后所检测到的外界感应电压之比值。一般而言，随着频率的升高，搭接效能将下降。但一旦搭接条自感与被搭接对象对地分布电容构成并联谐振时，搭接效能将急剧下降变为负值，见图9-44，这时搭接条成了危害源。随着搭接条长度的缩短，搭接条固有电感减小，搭接谐振谷点将向高频端移动。

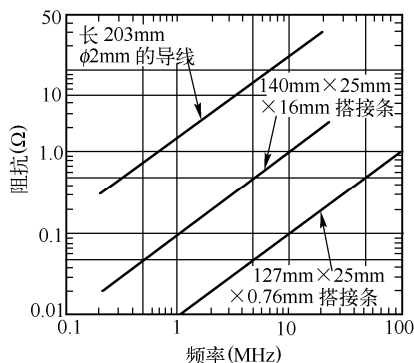


图 9-43 三种搭接条的射频阻抗图

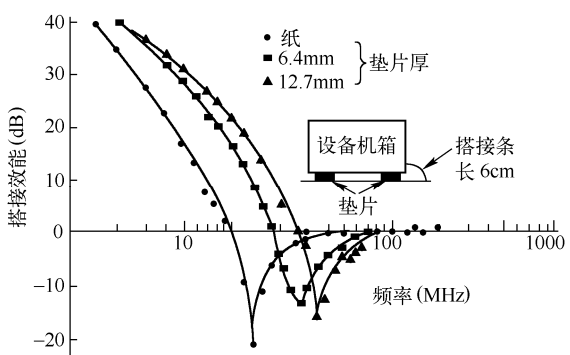


图 9-44 搭接条搭接效能的测量值

搭接条材料通常采用铜或铝。由于非同种金属间会产生电化学腐蚀作用，所以搭接条材料的电极电位应与被搭接金属的电极电位相接近。当两者电位相差很大时，可对搭接条镀以合适的电镀层，或在搭接过程中加进日后可更换的垫圈等辅料予以弥补。

3. 搭接结构设计举例

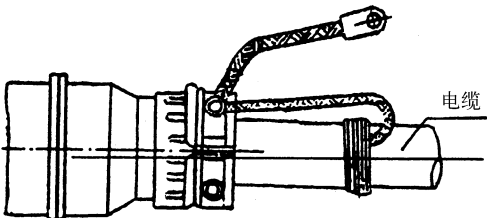
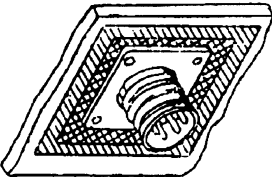
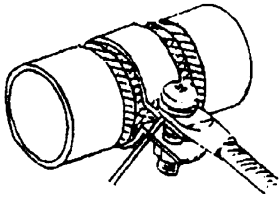
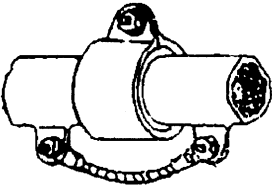
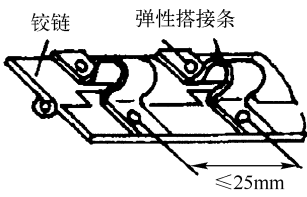
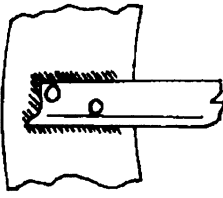
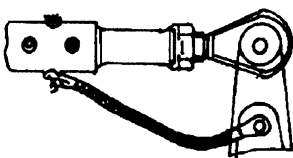
为了说明搭接设计的具体结构，表 9-2 列举了 20 种典型结构，读者可以参照设计。

表 9-2 典型搭接结构举例

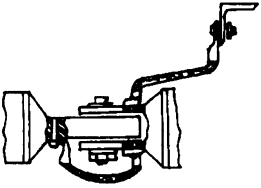
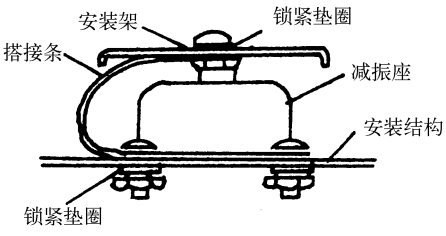
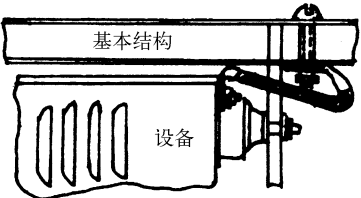
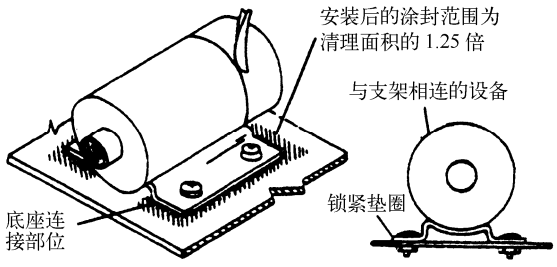
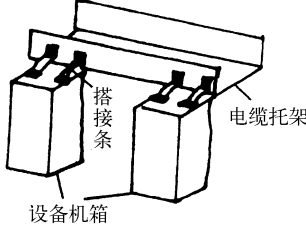
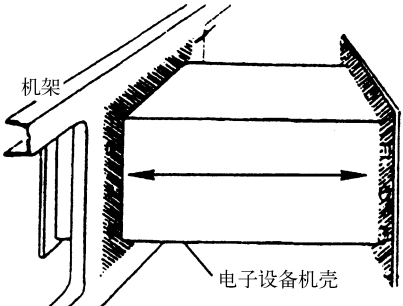
序号	搭 接 内 容	搭接结构和方法
1	两块金属体用螺栓搭接	
2	搭接线与金属构件用螺栓或螺钉连接	
3	屏蔽电缆的搭接	
4	束电线用卡箍与金属结构搭接	



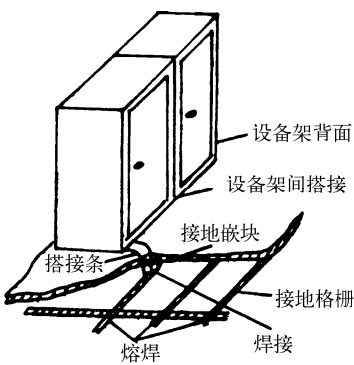
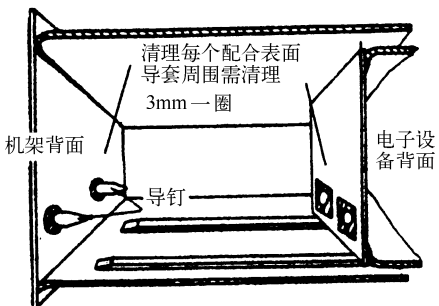
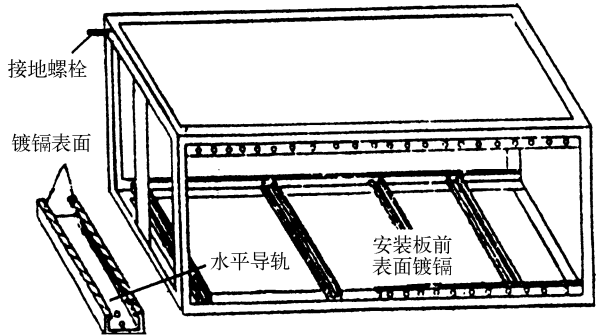
续表

序号	搭 接 内 容	搭接结构和方法
5	连接器与屏蔽电缆的搭接	
6	连接器座与机箱壳体的搭接	
7	金属管道的搭接	
8	两根管道衔接处的搭接	
9	活动铰链的搭接	
10	两种金属构件用搭接连接	
11	活动摇杆的搭接	

续表

序号	搭 接 内 容	搭接结构和方法
12	两个活动部件的搭接	
13	减振器的搭接	
14	设备外壳与基本结构搭接	
15	安装支架上设备的搭接	
16	机箱与电缆托架的搭接	
17	机壳法兰盘与机架的搭接	

续表

序号	搭接内容	搭接结构和方法
18	设备机箱之间以及与接地格栅的搭接	
19	设备机箱通过机架导向钉搭接	
20	机架内部的搭接	

### 9.2.2.2 搭接的加工方法

两种金属材料搭接的加工方法很多，可分为物理、化学和机械三类。

#### (1) 物理加工的方法

物理加工的方法主要有熔接、钎焊。热熔接合是通过气体燃烧和电弧加热使两种金属熔化流动形成连续的金属桥加工工艺，接合处的电导率高、机械强度好、耐腐蚀，但经济成本高。常用的熔接加工方法有气焊、电弧焊等。

钎焊是一种金属流动工艺，它把被连接的金属表面加热到低于熔点的温度，而后施加填充的金属焊料和适当的焊剂，通过焊料与连接金属表面的紧密接触实现结合。钎焊分为硬钎焊和软钎焊，软钎焊是一种更简单的连接工艺，钎焊使用的温度相当低，因此在那些可能出现大电流的场合不允许采用软钎焊方法。

### (2) 机械加工的方法

机械加工的方法有螺栓连接、铆接、压接、卡箍紧固、销键紧固、拧绞连接等方法。图 9-45 是螺栓紧固搭接条的典型结构。图中还给出了仪器面板上接地柱的安装结构。对于工作在甚高频以上的设备，由于集肤效应，地线电流只流过金属表面；若仪器面板表面涂漆时未在接地柱安装部位预留裸露的金属面或导电镀层，外来干扰容易通过接地柱串入仪器面板内表面。

### (3) 化学加工的方法

化学加工方法主要采用导电黏合剂。它是一种具有两种成分的银粉填充的热固性环氧树脂，经固化后成为一种导电材料。通常它应用于搭接金属的表面，既使之黏合，又形成导电良好的低电阻通路。不仅有很好的防腐能力，还具有很强的机械强度。有时它和螺栓结合使用，效果更佳。

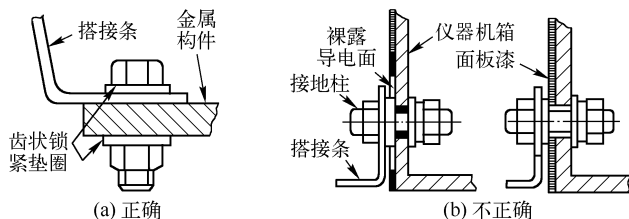


图 9-45 螺钉紧固搭接条结构

### (4) 搭接表面的清理和防腐涂覆

为了获得有效而可靠的搭接，搭接表面必须进行精心的处理，其内容包括搭接前的表面清理和搭接后的表面防腐处理。

搭接前的表面处理，主要是清除固体杂质，如灰尘、碎屑、纤维、污物等；其次是清除有机化合物，如油脂、润滑剂、油漆和其他油污等；还要清除表面保护层和电镀层，如铝板表面的氧化铝层以及金、银、镍、锡之类的金属镀层。

搭接完成后为了保护搭接体不直接暴露在空气中，在接缝表面往往要附加涂覆，如涂油漆或电镀覆盖层等，特别要注意保护阳极金属的表面。

#### 9.2.2.3 搭接质量的测试

目前用得最多的是采用四端法直接测量搭接点的直流或者低频搭接电阻。由图 9-46 可知，恒流源在被测搭接点（线、面）上形成电压降，然后用高灵敏度的数字电压表测出其电压降值再根据恒流源指示的电流值，推算搭接电阻。商品型微欧计输出电流较小，限制了它对大面积搭接接头的测量。

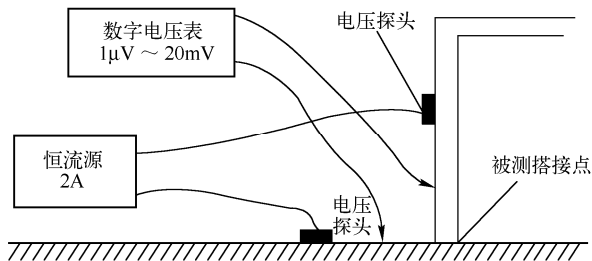


图 9-46 搭接电阻的测量方法

另外，利用专门的高频搭接阻抗测量探头、网络分析仪或者带有跟踪信号源的频谱仪，还可以测量出搭接条的高频阻抗特性。

## 第 10 章 信息及电力设备防护技术

### 10.1 信息电子设备防护技术

信息技术设备是指用于以下目的的设备：接收来自外部源的数据（如通过键盘或数据线输入）；对接收到的数据进行某些处理（如计算、数据转换、记录、建机分类、存储和传送）；提供数据输出（或送至另一设备或再现数据与图像）。这个定义包括那些主要产生各种周期性二进制电气或电子脉冲波形，并实现数据处理功能的单元或系统：诸如文字处理、电子计算、数据转换、记录、建档、分类、存储、恢复及传递，以及用图像再现数据等。

伴随着科学技术的进步，知识经济和信息时代已经到来，信息技术已渗透到了人类社会生产和生活的各个领域。各种电子信息设备大量涌现、广泛使用，特别是微电子技术的飞速发展，微电子器件的集成化、小型化、高速化的水平不断提高，而“三化”的必然结果是导致各种电子信息设备的耐过压、耐过流和抗雷电电磁脉冲的能力大大降低。例如，对于过电压，CMOS 芯片的耐压水平仅为 3~5V。对于磁场，当 LEMP 的磁场脉冲超过 0.07Gs 时，就会引起微机失效，当磁场脉冲超过 2.4Gs 时，集成电路就会发生永久性损坏。

#### 10.1.1 电子战与信息设备防护

1990 年的海湾战争已经给人们留下这样的印象：常规的硬杀伤武器在战争中已不再是唯一的主角，电子战能力的大小已成为决定胜负的关键之一。绝对控制着电磁频谱的多国部队在伊拉克百万大军尚未找到攻击目标时就将其击溃。美军的 E-3 预警机、F-4G “野鼬鼠”干扰机、隐形轰炸机和反辐射导弹都给人留下了深刻的印象。电子战越来越重要已毋庸置疑。

##### 10.1.1.1 基本概念

电子战是一种控制电磁频谱的战斗，可分为三大部分：电子支援（ESM）、电子干扰（ECM）和电子抗干扰（ECCM）。电子支援是指对敌方雷达和无线电进行侦听，典型装备有美军的 ALR-XX 系列。电子干扰是指扰乱、欺骗和致盲敌方电子设备，它又分为有源干扰（如噪声干扰和欺骗干扰）和无源干扰（如投放铝箔条带和曳光弹两大类），先进的电子干扰根据 ESM 收集到的情报采取对抗措施。电子抗干扰主要包括电子情报和信号情报以及保持友邻部队继续使用电磁频谱的有关行动。

##### 1. 有源干扰

电子干扰是电子战中最重要的一部分，而又以有源干扰为主。有源干扰主要包括以下几种机制：

（1）调幅载波干扰 即对恒定周期的载波进行幅度调制，它对雷达的作用距离有非常明显的影响。

（2）角度干扰 当扫描火控雷达的方位和高度信息存在于回波脉冲的调制成分中时所采用的一种对抗技术。干扰这个脉冲的办法是发射一个和雷达脉冲类似，但其调制信息与回波目标角度调制信息反相的脉冲。

(3) 异步脉冲干扰 这被认为是最有效的一种干扰方式, 干扰脉冲频率几乎和雷达脉冲重复频率完全匹配, 而且, 干扰机还能发射该频率的倍数频率; 如果干扰脉冲宽度大于雷达脉冲宽度, 干扰效果更好。

(4) 阻塞干扰 即对各个波段同时进行干扰。

(5) 欺骗性干扰 一种特殊的电子干扰, 主要用于对付火控雷达系统, 它不是消除目标信息, 而是阻止敌方建立有益的目标信息。它又分为人为性欺骗和模仿欺骗两种形式, 人为性欺骗包括改变或模拟己方的电磁辐射来进行欺骗; 模仿性欺骗包括将电磁辐射引进敌人的信道, 以模拟敌人的发射波。

(6) 插入 它也是一种欺骗技术, 即以任何一种方式在微波传输途径中插入额外的电磁成分, 以欺骗操作人员或引起混乱。

(7) 视频堵塞 指直接放大不含载频的白噪声, 使雷达接收机的噪声电平达到饱和。

## 2. 无源干扰

无源干扰是另一种电磁干扰形式, 通常有三种: 箔条、伪目标(浮动角反射器)和红外曳光弹。无源干扰在过去曾单独发挥过重要作用, 但现在一般把它作为有源干扰的有益补充。

## 3. 射频武器

在未来, 由于武器装备的电子化程度越来越高, 电子战中的各种干扰手段可能被射频武器取代。射频武器峰值功率比一般电磁干扰高几个量级, 讲究对电子元件的“硬杀伤”, 因此, 它可能给电子战的作战概念带来革命性变化。

### 10.1.1.2 常规(低功率)干扰机

电子战的作战平台可分为飞机、舰船和陆地车辆三种, 各种装备的设计以及作战方式一般都受制于所属作战平台。

#### 1. 陆军干扰机

陆军对电子战的重视程度相对较弱, 美陆军电子战投资仅占三军电子战投资的 10% 左右。陆军的干扰机趋于进攻性: 中断敌方通信网络, 不重视自我保护。装备主要有两类:

(1) 车载大功率干扰机, 如美国 GTE-西尔范尼亚公司研制的 MLQ-34 TACJAM 干扰机。

(2) 投掷式干扰机(遥控飞机), 如美国 AEL 公司生产的“Applique”干扰机。

陆军干扰机的技术发展方向在于系统的一体化设计, 干扰技术本身不存在困难。

#### 2. 舰载干扰机

舰载电子战装备的根本目的就是实现军舰的自我保护, 在整个电子战的投资中, 海军占 40% 左右, 可见舰载干扰的重要性。采用的干扰技术主要有以下四种。

(1) 箔条 它属于无源干扰, 其原理是投放割成敌方雷达信号波长的铝箔条带, 以对付雷达制导的导弹。技术关键在于增大偶极子密度(如生产直径为 20mm 的铝箔丝); 采用先进的箔条材料、先进的封装和布撒技术, 从而延长箔条的有效滞空时间; 优化箔条形状并产生最大的微波反射截面(RCS)。在目前及未来, 箔条仍将对付雷达制导威胁的主要软杀伤手段, 北约海军普遍布署, 但其性能也受到一定怀疑, 新一代反舰导弹采用毫米波导引头, 要切割如此小的偶极子相当困难, 而得不到好的极化率将大大降低干扰效果。另外, 美海军认为, 先进的射频(RF)导弹寻的头不久将通过识别技术来区分金属箔片和真实目标。将箔条与下面所述的各种诱饵结合使用方可达到最佳干扰效果。

(2) 主动离舰诱饵 一次性使用的主动诱饵尽管价格比箔条昂贵得多, 但它具有如下几个

重要特性：避免与军舰的其他自防御系统（如反导导弹和快速火炮）相互干扰；每次交战只需发射一个主动诱饵；无需强烈的规避机动；能够诱惑最先进的雷达导引头。主动离舰诱饵的工作方式是：在发射管中待命的诱饵通过电缆接收来自军舰电子支援措施（ESM）系统传来的威胁数据，然后选择最具威胁的方位发射，在离舰几百米处，火箭发动机熄灭，降落伞展开，诱饵可滞空几分钟，当它稳定飞行后，两个突伸天线激活，其中一个接收反舰导弹导引头的发射信号，然后，由另一个天线将其放大并辐射回去，以欺骗反舰导弹。这种形式的离舰诱饵有英 GEC 马可尼公司研制的“塞王”诱饵。另一些主动离舰诱饵可长达几小时地漂浮在海面上，如美利顿公司的 AN/SSR-95（V）主动电子浮标。诱饵的工作波段一般为 I/J 波段。

（3）浮动角反射器 此类诱饵作为箔条的补充，可提供独特的持久干扰（几个小时）以对付雷达制导的反舰导弹。这类诱饵中最著名的是 Replica，它的关键之处是一个八面形反射器（可膨胀，一般由镀银网制造），它具备全方位反射能力，可模拟出中型军舰的雷达反射截面（RCS），是相当有效的伪目标。

（4）红外诱饵 目前许多反舰导弹都采用 IR 导引头，如冥河、蚕式、AGM-108 和 SASM-2 导弹（日本）等。老式 IR 寻的“热点”是发动机废气（ $3\sim 5\mu\text{m}$ ），而新式导引头主要寻的舰壳体和上部结构产生的长波（ $8\sim 10\mu\text{m}$ ）辐射。

在常规的电子战中，为保护昂贵的水面舰艇，综合使用各种干扰手段是必要的，舰艇平台的承载力对于干扰设备而言也是巨大的。相比之下，单纯的噪声干扰要落后一些，因为今天的雷达制导可通过切换成只接收和对准干扰寻的模式，有效地将电子对抗转换为电子引导，因此有源诱饵显然更具备前途，它很有效地遂行一个简单任务，即如果干扰不了导弹，那么自己成为被攻击目标，把导弹引开。

### 3. 机载干扰机

有 3 种干扰系统可用于保护作战飞机，即防区外干扰机、护航干扰机及自保护干扰机，前两种干扰机功率大、成本高、技术也复杂。

#### （1）机载干扰机的总体情况

① 干扰目标。各种地基和机载雷达（远程监视雷达、捕获雷达、测高雷达、跟踪雷达）、雷达制导的导弹导引头、通信链路和询问敌友系统都属干扰目标。远程监视雷达工作频率较低，在大多数情况下，攻击方不是力争干扰它们，而是采取规避行动。捕获雷达是一种近程监视雷达，工作在 E、F 或 G 波段，如有可能，应对其实施干扰，让跟踪雷达无法从捕获雷达获取定位信息。跟踪雷达应是最优先干扰的威胁目标，一般工作在 H、I 或 J 波段。雷达制导的导弹导引头与跟踪雷达类似（如果它们的偏角大于  $2^\circ\sim 3^\circ$ ，一般就会丢失目标）。

干扰方式分噪声干扰和欺骗干扰两大类。有源噪声干扰对于那些天线波束特别宽，旁瓣较大的雷达很有效。一般情况下，真实回波的功率只有几分之一瓦，而噪声干扰机轻而易举便可以产生十几瓦功率的噪声，当噪声信号通过主波束或旁瓣进入雷达接收系统后，将饱和雷达接收机，掩盖真正的回波信号。撒布铝箔条带或红外曳光弹也属于噪声干扰。欺骗干扰是对付跟踪雷达最通用的方法，它并不是产生大面积遮掩信号，而是发射功率较低的仿造或假造回波信号，促使受骗雷达得出虚假距离或虚假方位数据。虚假信号要想有效，必须非常严密地模仿真实雷达回波信号的包络、相位及其他特征。欺骗干扰机首先需接收、存储并分析雷达发射信号，再模拟产生出虚假回波，因此，它们又被称为“应答式干扰机”。欺骗式干扰可对付频率转换和频率捷变等反措施，还可对抗多卜勒脉冲雷达发射的复杂信号。

② 稠密信号环境。在早期电子战中，一部雷达每秒只辐射 500~1 500 个脉冲，而现在每秒

脉冲数超过 100 万个。越战期间, 雷达最高工作频率为 12GHz, 而现在一些军用系统的工作频率高达 40GHz。今天, 在北约成员国土上,  $1\,000\text{km}^2$  约有 360 套信号发射装置, 在一些高度设防区, 信号密度可能高达每秒 1 000 万个脉冲。雷达的占空系数越来越大, 峰值功率越来越低, 加之采用跳动或错脉冲重复频率、脉冲压缩或脉冲多卜勒等抗干扰技术, 使得电子战情景更加复杂。要使干扰机有效地实施干扰, 必须具备两项技术: 一是正确识别威胁辐射装置, 二是能有效地管理干扰功率。

### (2) 机载干扰机的发展趋势

① 欺骗式干扰胜于噪声干扰。投掷式有源诱饵是美空军研制的重点项目, 它的工作原理可用“应答式”来概括。有源诱饵有以下优点: 与无源诱饵相比较, 它产生的特征波形更为逼真, 雷达截面更大。第一代有源诱饵代表是 ALE-50, 该诱饵主要有三个部件: 发射器、接收机和电源, 它将接收到的威胁雷达信号放大再发射出去, 有时加上一个小的调制来模拟飞机引擎特征。雷达接收到两个信号, 一个是从飞机反射的回波, 一个是从诱饵来的强度更大且特性一样的信号。雷达或导弹寻的头不能区分这两个信号, 就只能假设二者中强者为目标。

但当人出现在处理环路中时, 显然人的智慧是有可能区分诱饵和真实目标的。故而美空军正在积极发展第二代有源诱饵, 即光纤诱饵; 光纤诱饵十分小巧, 仅有发射设备, 其余工作由其平台(飞机)代替完成, 光纤诱饵经光纤从飞机接收指示, 除发射诱饵信号外, 也生成一个覆盖脉冲, 使飞机逃脱雷达的探测。正在研制的光纤诱饵型号为 ALE-55, 由于光纤诱饵体积小重量轻, 意味着飞机可携带更多诱饵参加战斗。

除了自保护性有源诱饵外, 还有一类防空压制用有源诱饵, 如 BQM-74 无人驾驶飞机, 它是一种多目标产生器。所谓多目标产生器是根据雷达脉冲重复频率、扫描速度和天线波瓣特征计算出应该发射的假目标信号, 这些假目标在雷达屏幕上大量出现, 使操作人员的处理能力超过极限。这种干扰表征为多目标的突然出现, 它们或是静止不动, 或处于不合理的运动方向, 或以不合理的速度运动。在海湾战争中, 这类有源诱饵不但欺骗和饱和了伊军防空系统, 成为伊军防空雷达跟踪的目标, 而且使美军得以精确定位这些雷达, 然后用反辐射导弹摧毁它们。

② 干扰机应尽量与其他电子战设备实现一体化。主要表现为以下几点: 一是飞机的运载能力要求将告警接收机、干扰机、箔条弹、曳光弹撒布器、导弹接近告警以及拖弋式或一次性诱饵组合在一起, 安装在飞机内或吊舱式系统中。二是在未来的飞机上, 大功率的射频干扰机可能和雷达及通信系统共同使用一个大功率主动阵天线, 如休斯飞机公司一直在研究的“多功能孔径共享系统”方案就是这样。三是各种干扰手段配合使用。如飞机在自我保护时, 先投放几轮箔条, 暂时迷惑导弹寻的头, 然后再投放有源诱饵, 而当导弹重新截获目标时, 实际上往往跟踪上了假目标。闪烁也是一种重要的电子对抗技术, 应用于两架相距不远而在雷达系统中又处于同一方位角分辨率内的飞机, 这两架飞机轮流地发出干扰, 从而引起雷达系统中的目标信号来回振荡, 使其不可能为火力控制提供准确的信息。

飞机自保护系统过去曾被重点装备于造价昂贵的轰炸机, 如 B-1 或 B-2 轰炸机。如今, F-15 或 F-16 等也对自保护系统十分重视, 并从悬挂箱式向内装式发展。

#### 10.1.1.3 射频武器对电子战的影响

以上论述仅局限于常规的电子战, 现役的干扰机的功率一般都在千瓦(kW)量级或以下, 而杀伤性的定向能微波武器峰值功率应在吉瓦(GW)以上, 介于二者之间的是兆瓦量级的强力干扰。而在未来, 随着射频武器的出现, 电子战的许多概念都会更新。



射频(RF)武器对将军们有着极大的诱惑力,想象中的对电子设备的强大杀伤力正源源不断地吸引着投资。美国、俄罗斯、英国、法国和瑞典等国都在从事这方面的研究。下面从技术基础、射频武器分类和射频武器效应三方面扼要介绍一下射频武器的研制发展情况。

### 1. 技术基础

从技术角度看, RF 武器涉及如下几方面的问题: 功率源、微波发生器、发射天线和开关技术。目前, 每个方面都未完全达到武器化要求。

(1) 脉冲功率源 若采用可重复使用的脉冲功率源, 现有的电容器、变压器和脉冲形成线的指标都要大大提高, 如现有电容器最高储能密度为  $1\text{J}/\text{cm}^3$ , 而高功率微波(HPM)要求为  $20\text{J}/\text{cm}^3$ 。一次性使用的脉冲功率源比较有前途的有两种: 爆炸驱动磁通量压缩发生器和磁流体动力学装置, 它们都是将炸药和推进剂(储能密度为  $8\,000\text{J}/\text{cm}^3$  量级)的化学能转换为强大的电能。如假设  $1\text{kg}$  的 TNT 在  $10\mu\text{s}$  内释放  $5\text{MJ}$  的能量, 一台爆炸驱动磁通量压缩发生器装置的转换效率为  $15\%$ , 则输出的电能为  $0.75\text{MJ}$ , 输出功率为  $75\text{GW}$ , 这和典型的闪电产生的电流指标不相上下, 而估计真正使用在武器上的一次性脉冲功率源的指标比典型的闪电至少要大 10 倍。

(2) 高功率微波(HPM)发生器 常见的高功率微波发生器有相对论磁控管、相对论速调管、Reltron、虚阴极振荡器、多波契伦柯夫发生器和磁绝缘线性振荡器(MILO, 一种类似磁控管的器件, 但不需要外部磁场)等, 其中, Reltron、MILO 和虚阴极振荡器等都是很有前途的高功率微波器件。上述高功率微波源频带窄, 重复使用频率目前仍很低, 有的不到 1 次/秒(如相对论速调管), 但输出峰值功率普遍在  $100\text{MW}$  以上, 有的达  $10\text{GW}$ 。高功率微波源将来要解决的问题是: 单次使用源应当小型化和紧凑化; 重复使用源应当尽可能提高重复频率; 提高电能和微波能之间的转换效率; 在提高峰值功率的同时, 应当注意提高平均功率, 以提高整个输出能量。此外还有超宽带的高功率微波源, 它紧凑轻便, 峰值功率极高(目前已达  $100\text{GW}$ , 但平均功率低), 脉冲重复频率也很高(目前为  $1\text{MHz}$ ), 更为重要的是所含频谱极其丰富, 因此, 特别受到军方关注。

(3) 发射天线和开关技术 无论窄带还是超宽带源, 都希望天线增益大, 辐射能量相对集中, 脉冲重复频率大, 如此可大大提高杀伤效果。但是, 天线增益受制于辐射微波波长和有效孔径的尺寸, 在增大天线尺寸仍然无法提高增益的情况下, 只能想办法尽量提高发射功率。至于能量聚焦, 目前美军设计的一种类似圆盘反射器的天线已经可以把输出能量汇集在  $30^\circ$  范围内。

### 2. 射频武器的分类

(1) 电磁脉冲(EMP)武器 电磁脉冲是一个辐射持续时间很短的宽带信号, 可来源于核爆(NEMP, 核电磁脉冲), 也可由上述的磁通量压缩发生器和磁流体力学发生器等装置产生(NNEMP, 非核电磁脉冲)。电磁脉冲的特点是: 场强高, 核电磁脉冲大约是  $10\sim 100\text{kV}/\text{m}$ (空气的击穿电压大约为  $30\text{kV}/\text{m}$ ); 频域宽, 从极低频到超高频, 其中大部分能量集中在  $100\text{kHz}$  以下, 主频在  $10\text{kHz}$  至  $20\text{kHz}$  之间(波长几百米)。电磁脉冲武器很可能以炸弹形式存在(直接用通量发生器产生电磁脉冲), 由火炮发射或用巡航导弹装载。是否有以车辆为平台可重复使用的电磁脉冲发射机暂不肯定, 因为对电磁脉冲输出的能量进行聚焦不是一个简单问题, 而没有好的聚焦, 则既不能提高攻击效果, 又难以保障自身系统的安全。电磁脉冲武器可主动攻击敌方电子信息系统, 也可拦截来袭导弹。

(2) 高功率微波武器 高功率微波武器的输出频带远没有电磁脉冲宽, 但其主频可落在几百兆赫兹至几十吉赫兹范围内(波长可达米甚至毫米), 而且频带窄, 能量相对集中。因此, 高

功率微波武器对雷达等系统的打击效果更佳,波长短的另一优点是,它比电磁脉冲更容易从后门耦合到系统内部,这带来更大的杀伤概率。高功率微波武器可能以微波弹和强力干扰机两种形式存在。微波弹由磁通量压缩发生器或磁流体力学发生器向虚阴极振荡器供电产生吉瓦量级的微波,再由天线向外定向发射,属典型的窄带,打击目标相对固定,例如,专门攻击导弹寻的头或某种雷达。强力干扰机以车辆、飞机和军舰为平台,采用相对论速调管等微波器件,由电容器或炸药提供能源,是一种很好的自保护武器,可用它攻击反辐射导弹。

(3) 超宽带(UWB)干扰机 这类射频武器的最大优点是可做得小型、紧凑和轻便,而且所含频谱丰富。和微波弹一样,它的主频在微波段,但频带又相当宽,有的达吉赫兹,因此,超宽带干扰机作为飞机的自保护装置是很有前途的。现有的超宽带源峰值功率已达几十吉瓦,脉冲重复频率为兆赫。但是,超宽带源的平均功率并不高,因此频带不宜过宽,否则能量太分散。

### 3. 射频武器效应

射频武器辐射功率强大,无须精确瞄准,并且大气对于微波几乎是“透明”的(大气击穿例外),这些优点使得射频武器具备过去的电子战武器无法想象的效应。

(1) 攻击效果 一般分三个等级:硬杀伤、扰乱和干扰。硬杀伤,用于彻底毁坏电子元器件,甚至导致导弹和飞机等武器的自毁;扰乱,是指电子元器件在未损坏的情况下,整个系统处于混乱状态,无法或暂时无法恢复正常状态,虽然射频武器攻击已停止。

(2) 耦合途径 可分为前门耦合与后门耦合两种。前门,就是电子系统的工作通道,如天线;天线包括发射器和接收器两大部分,但 RF 武器主要攻击接收系统,因为发射系统本身能忍受很大的功率(几百瓦),而接收信号往往只有毫瓦量级,因而接收系统要脆弱得多。后门,是电子系统的非工作通道,如一些裸露的电缆,外壳上的一些缝隙等。从前门攻击需知道靶的更多信息,从后门虽无需了解过多的靶信息,但攻击确定性太差。

(3) 杀伤机制 射频武器的真正杀手是在靶中产生的感生电流和感生电压。电磁脉冲的能量主要集中在低频部分,由于波长长,主要在靶外壳上产生感生电流和感生电压;微波弹波长在厘米或毫米量级,可从靶外部的缝隙耦合到系统内部破坏电子元件。对电子元件的破坏机理分热效应和场效应两种。热效应主要由毫秒量级的长脉冲造成,电子元件上累积的热量有一个可传递过程;场效应为纳秒量级的短脉冲造成,在高场强短时间作用下,元件上的热量无法向外散发,破坏能量阈值比热效应低。无论长脉冲还是短脉冲,重复频率越高,杀伤概率越大。

(4) 攻击目标 射频武器攻击的最佳目标之一是军用和民用电子中心(削弱敌方军事基地的运作能力),如指挥部、军舰、通信大楼和政府要地等。这些目标要做到很好的电磁屏蔽是不可能的,后门特别容易进入。射频武器的攻击目标之二是敌防空系统(压制敌防空系统,简称 SEAD)。攻击目标之三是战术导弹(武器平台的自我保护),地空、空空和舰空导弹都在主要打击目标之列,摧毁更好,但使其丢失目标或偏航即达到目的。

### 4. 装备情况

在短期内,现有的干扰技术是不会退出战争舞台的。但是,从军方的角度来看,干扰始终存在不确定性,因此对信息电子系统的硬杀伤的诱惑力更大。而且,随着研究的进一步深入,射频武器的成本越来越低,而对它的防范却很难做到完善,且耗资庞大(相对于射频武器的研制费更是如此),射频武器的这一特点比常规的电子干扰要优越得多。可以肯定,未来电子战的方向在于大力发展射频武器。

#### 10.1.1.4 电子战中的防护技术

##### 1. 一般防护措施

为了减少现代电子战对信息电子系统的影响,可采用以下几种方法:

- (1) 电磁屏蔽法。
- (2) 电势平衡法。
- (3) 系统分割(拓扑分割和功能分割)法。
- (4) 绝缘法。
- (5) 电源防护法。
- (6) 加滤波器法。
- (7) 系统中加上备份设备。
- (8) 采用更耐用的电子元件。
- (9) 将暂时不需要的电线断开。

随着光缆在电信网中的应用,可以规划一个带有 EMP 防护的、高级的与普通电信网并存的专用网。应该在尽可能靠近交换机、计算机和可视终端的地方进行光电转换。所有这些电气功能部件都必须配备 EMP 防护措施。

建造机房时应使之具有电磁屏蔽功能,为此可使用密眼钢筋网,并且在所有可能的地方使钢筋互相连接。在设计阶段还可以对室外和室内电线的布置作一些调整改进。可以让外部电力线、电信电缆和接地导线从同一个地方进入建筑物。在这个公共入口处,电缆屏蔽层和设备地线都要接到公共接地板的外端,公共接地板还要与建筑物的金属骨架相连接。这样布置能使室外电线上的感应电流只有一小部分进入室内。

电力线和电信线的浪涌防护装置应安装在接地板处,使它们与接地板的连线尽量短,不然,即使最好的过压保护器也会失去作用。可能的话,应该采用屏蔽电缆,或将电缆穿入屏蔽套管中。在某些国家,是将电缆穿入铁管中,铁管之间用螺纹连接。对于含有高频成分的高速浪涌,编织屏蔽层或其他可透过电磁波的屏蔽层的防护能力远不如匀质屏蔽层(密实屏蔽层)。同时,电缆不能布置在靠近建筑物屏蔽层的缺口处,如门。

被屏蔽设备的通风、透光、输油、进水、出水等各种管、孔的布置都应特别谨慎,例如,采用波导管,通常把它们做成一节一节的蜂窝结构,这样每节就可以制得短一些,并且连接之后的总衰减能力与单节相等。

电信设施从外层到内层,各层的浪涌防护形式是不同的,外层叫初级防护,内层叫次级防护,但各层的连接原理都是相同的。最后一级的防护器必须装在尽可能靠近要防护的设备处。浪涌防护器和屏蔽层的防护能力必须对传导效应和辐射效应都有效。采用过压保护器时,其幅限是时间的函数,而采用滤波器时,其幅限则是频率的函数。浪涌防护器可以采用二者之一构成,也可以由二者结合而成。随着电源电压升高,电源滤波器需要增大,价格也就更贵。因此,只有非常灵敏的设备才采用滤波电源,而灵敏度和优先级低的设备或部件采用防护性能较差的电源是比较经济的。但这又意味着,在布置防护等级不同的导线时,必须保证它们之间的互感可以忽略不计。

如果传输设备所用的频带较窄,那么可为它装滤波器以衰减掉工作频带以外的无用信号。在高频段,可以利用四分之一波长短路传输线进行滤波。该四分之一波长短路传输线与正常传输线并联连接。对于四分之一波长奇数倍所对应的频率,该短路传输线呈开路,对于偶数倍四分之一波长所对应的频率和低频,该短路传输线将起短路作用。

## 2. 核电磁脉冲的防护

核电磁脉冲对电子设备的破坏是电磁作用的结果,与雷电电磁脉冲、无线电干扰波、雷达波在本质上是一致的。因此,对核电磁脉冲,可以根据电磁原理采取必要的措施进行防护。

### (1) 屏蔽

预防核电磁脉冲的方法是用高电导率和高磁导率的金属材料把电子设备屏蔽起来,并设有良好的接地线,同时所有穿过屏蔽的导线、水管以及门窗通气孔等处施加防护措施。这样,核电磁脉冲就很难到达设备内部的敏感元件处。

### (2) 浪涌保护器 SPD 对核电磁脉冲的防护

由于核电磁脉冲具有幅度大、作用时间短、频谱宽、作用范围广的特点,要对其进行有效的防护,就需要依据其特点,对其进入设备的电源及信号线路安装专用的防护装置。该防护装置的响应时间必须小于 10ns;工作频率应该在 0~150MHz 现代军用电子设备使用的频段;尖峰抑制电压应大于 100kV;电源线路脉冲电流泻放能力应大于 100kA;外置天线馈线线路脉冲电流泻放能力应大于 100kA;信号传输线路脉冲电流泻放能力应大于 10kA。这样的参数对 SPD 设备的研制提出了重大的挑战。

依据核电磁脉冲特点及军用设备使用条件,可分为设备电源、外置通信天线馈线、信号传输线三部分对核电磁脉冲进行防护。

① 设备电源的防护。电源线路的波阻抗  $Z$  为一常量,其大小决定于单位长度导线的电感和电容,它是一个具有阻抗的量纲,故称之为波阻抗,用  $Z$  来表示。架空线的波阻抗为  $470\Omega$ ,电力电缆的波阻抗为  $10\sim 50\Omega$ 。核电磁脉冲的电场强度最大可达  $100\text{kV/m}$ ,是无线电波电磁场的几百万倍。若以电力电缆的波阻抗为  $10\sim 50\Omega$  计算,依据其电场变化,其在  $10\sim 20\mu\text{s}$  间的电源线路脉冲电流峰值将大于 100kA。

因此,在对电源线路进行保护时,依据习惯上的 SPD 测试波形,其 SPD 需要注重 3 个参数:

- a. 其响应时间应小于 10ns。
- b. 其  $1.2/50\mu\text{s}$  电压脉冲承受峰值应大于 100kV。
- c. 其  $8/20\mu\text{s}$  电流脉冲承受峰值应大于 100kA。这样的参数对 SPD 设备的要求是极为苛刻的,只有极少数的 SPD 设备可以达到。

② 外置通信天线馈线的防护。军用天线常采用八木定向天线(由日本人八木发明,故称八木天线)。其输入阻抗为  $Z_{\text{in}}=73.1+j42.5(\Omega)$ 。天线的输入阻抗  $Z_{\text{in}}$  定义为:天线输入端信号电压与信号电流之比。输入阻抗具有电阻分量  $R_{\text{in}}$  和电抗分量  $X_{\text{in}}$ ,即  $Z_{\text{in}}=R_{\text{in}}+jX_{\text{in}}$ 。电抗分量的存在会减少天线从馈线对信号功率的提取,因此,常将其长度缩短(3%~5%),来消除其中的电抗分量。

③ 信号传输线的防护。对于具有屏蔽层的,且屏蔽层良好接地的信号传输线路,其受核电磁脉冲的破坏要小于电源和外置通信天线馈线线路,它对尖峰电压的抑制能力大于 20kV,脉冲电流泻放能力大于 10kA。但受工作频率的限制,其响应时间应小于 1ns。这个要求使许多使用 MOV、TVS、GDT 元件的 SPD 产品的保护能力变得不可靠,只有使用响应皮秒级元件的 SPD 产品才具有可靠的保护能力。并且对于 SPD 产品本身,其内部电路也应具备尖峰电压抑制和脉冲电流泻放两套分立的电路。这样品质的 SPD 产品,在目前国内的防雷产品中也只有极少数。

综上所述,核电磁脉冲并不是想象中的那么可怕,是无坚不摧、无孔不入的。只要了解了它的破坏机理,针对其幅度大、作用时间短、频谱宽、作用范围广的特点,可采用钢、铁、坡莫合金等高磁导率材料和合理的屏蔽体机构,对其进行屏蔽。对设备电源、信号线路安装专用的高性能 SPD,核电磁脉冲也可以象雷电电磁脉冲、无线电干扰波、雷达波一样,根据电磁原理是可以

采取必要的措施进行防护的。

### 10.1.2 信息设备防电磁泄漏

电子信息设备的电磁辐射有两方面的影响：一是对电磁环境构成污染；二是对信息安全与信息保密构成严重威胁。对于由数字电路组成的信息设备来说，由于辐射频谱及谐波十分丰富，因而很容易被窃听和破译。事实上，通过捕捉信息设备辐射的电磁波谱来获取所需要的情报和信息已成为现代科技在侦察术上的集中表现。

20 世纪 70 年代，在电子设备防干扰领域发展起来的一个新的研究方向，称为防电磁泄漏技术 TEMPEST (Transient Electromagnetic Pulse Emanation Standard)。TEMPEST 的理论与技术仍然以 EMC 为主要基础，它的任务是检测、评价和控制来自机要信息设备的非功能传导发射和辐射发射，以防止窃听泄密的危险。

以美国为首的少数几个发达国家在防电磁泄漏技术 TEMPEST 的发展中经历了这样几个阶段：

(1) 认识阶段 (20 世纪 50 年代初、中期) 这一阶段主要解决对信息泄漏严重性的认识问题，对具体技术问题归类预研。

(2) 发展阶段 (20 世纪 50 年代后期至 70 年代末) 这一阶段主要制定了 TEMPEST 发展方案，开展了一系列有计划、有组织、有针对性的攻关研究。

(3) TEMPEST 技术标准化、专业化、市场化 (20 世纪 80 年代后期至今) 这一阶段制定和颁布了一系列 TEMPEST 标准和规范，TEMPEST 技术也开始产品化。

TEMPEST 为了防止信息泄漏，除了一般电子设备防干扰的抑制技术外，还采用乱真发射的方法施加干扰，避免有意窃听。例如，早在海湾战争期间，美国就发射了一颗间谍卫星，这颗卫星装有最先进的 TEMPEST 收发系统用以截获伊拉克及海湾地区的政治、军事、经济情报，在这些情报中，有一部分是破译出来的，而相当多的部分则是利用对方电子设备无意电磁发射来获取的。这颗卫星的另一个功能是由 TEMPEST 发射系统释放乱真电磁波，以保证美军情报信息不被破译。

#### 10.1.2.1 移动通信设备防电磁泄漏

作为近年来信息技术领域发展最为迅速的移动通信设备，已经成为人们生活中不可缺少的通信手段，而与此相关的干扰问题也变得愈来愈多、愈来愈复杂。以手机为例，随着移动通信的快速发展，手机已进入千家万户，在我国，每 3 人中便有 1 人拥有手机。小小手机连接全球，在给人们的生活带来方便的同时，也为侦察、窃听与搜集信息情报提供了可乘之机。

为什么说手机也能失密呢？手机的通信过程就是使用手机把语言信号传输到移动通信网络中，再由移动通信网络将语言信号变成电磁频谱，通过通信卫星发射传送到受话人的电信网络中，受话人的通信设备接收到无线电磁波，再转换成语言信号接通通信网络。因此，手机通信是一个开放的电子通信系统，只要有相应的接收设备，就能够截获任何时间、任何地点、任何人的通话信息。

由于手机通信导致失密泄密的例子很多。其中，最典型的是 1996 年 4 月 21 日深夜，俄罗斯车臣叛乱分子的最高头目杜达耶夫，乘汽车藏匿于荒无人烟的山野，谁料到两枚导弹竟像长了眼睛似的从天而降，送他命归黄泉。俄军是如何发现杜达耶夫行踪的呢？原来杜达耶夫用手机通话时，其无线信号被俄军一架电子侦察飞机迅速捕捉到，然后通过卫星定位系统快速侦察测向与定

位, 探明他所处的方位, 使杜达耶夫招致了杀身之祸。随着通信技术的发展, 有的手机具备“位置服务”功能, 别人能通过这种服务随时跟踪你的位置。

不打手机也能泄密。因为在待机状态下, 手机也要与通信网络保持不间断的信号交换, 产生电磁频谱, 所以很容易被识别、监视和跟踪。如果把手机关闭是不是就绝对安全了呢? 这也未必, 持有特殊仪器的专家仍可遥控打开手机话筒。还有些手机早在制造过程中就在芯片中植入特殊功能, 只要有电池, 手机就会悄悄地把说的话接收下来, 通过卫星发送给“感兴趣的人”。

新修改的《中国人民解放军内务条令》明确规定: “严禁将移动电话带入作战室、情报室、机要室、通信枢纽、涉密会场、军用飞机和舰船、重要仓库、导弹发射阵地等场所; 在设有有线通信工具的场所工作时, 不得使用移动电话办理公务。严禁使用移动电话、寻呼机谈论、传送涉密信息。”不许带手机进重要场所并非我国首创, 一些发达国家的情报部门、军方和重要政府部门都禁止在办公场所使用移动电话, 即使是关闭的手机也不允许带入。为保证信息安全, 政府重要部门和领导人在开会时要把手机电池取出, 并和会场隔离, 以防万一。

#### 10.1.2.2 计算机防电磁泄漏

当计算机及其外部电子设备工作时, 机密信息可通过设备泄漏的电磁波辐射出去, 也可能通过电源线、地线和信号线以传导的方式耦合出去。测试结果表明: CPU、内存、I/O 接口、时钟、视频、字库、传输线、电源线等部位都有较强的电磁辐射, 用灵敏度较高的接收机或电视机在几百米之外就可有效地截收显示器的显示信号。计算机系统的防电磁泄漏已成为一个迫切需要研究的问题。

计算机主机及其附属电子设备, 如视频显示终端、打印机等在工作时不可避免地会产生电磁波辐射, 这些辐射中携带有计算机正在进行处理的数据信息。尤其是显示器, 由于显示的信息是给人阅读的, 是不加任何保密措施的, 所以其产生的辐射是最容易造成泄密的。使用专门的接收设备将这些电磁辐射接收下来, 经过处理, 就可恢复还原出原信息。国外计算机应用比较早, 计算机设备的辐射问题早已有研究, 在 1967 年的计算机年会上美国科学家韦尔博士发表了阐述计算机系统脆弱性的论文, 总结了计算机四个方面的脆弱性, 即处理器的辐射、通信线路的辐射、转换设备的辐射、输出设备的辐射。这是最早发表的研究计算机辐射安全的论文, 但当时没有引起人们的注意。1983 年, 瑞典的一位科学家发表了一本名叫《泄密的计算机》的小册子, 其中再次提到计算机的辐射泄漏问题。1985 年, 荷兰学者艾克在第三届计算机通信安全防护大会上, 公开发表了他的有关计算机视频显示单元电磁辐射的研究报告, 同时在现场作了用一台黑白电视机接收计算机辐射泄漏信号的演示。他的报告在国际上引起了强烈反响, 从此人们开始认真对待这个问题。据有关报道, 国外已研制出能在 1km 之外接收还原计算机电磁辐射信息的设备, 这种信息泄露的途径使敌对者能及时、准确、广泛、连续而且隐蔽地获取情报。计算机电磁辐射泄密问题已经引起了各个国家的高度重视, 要防止这些信息在空中传播, 必须采取防护和抑制电磁辐射泄密的专门技术措施, 这方面的技术措施, 有干扰技术、屏蔽技术和 TEMPEST 技术。

##### (1) 配置视频信息保护机(干扰器)

视频保护(干扰)技术又可分为白噪声干扰技术和相关干扰技术两种。白噪声干扰技术的原理是使用白噪声干扰器发出强于计算机电磁辐射信号的白噪声, 将电磁辐射信号掩盖, 起到阻碍和干扰接收的作用。这种方法有一定的作用, 但由于要靠掩盖方式进行干扰, 所以发射的功率必须够强, 而太强的白噪声功率会造成空间的电磁波污染; 另外白噪声干扰也容易被接收

方使用较为简单的方法进行滤除或抑制解调接收。因此,白噪声干扰技术在使用上有一定的局限性和弱点。

相关干扰技术是一种比白噪声干扰技术更为有效和可行的干扰技术。相关干扰技术的原理是使用相关干扰器发出能自动跟踪计算机电磁辐射信号的相关干扰信号,使电磁辐射信号被扰乱,起到乱数加密的效果,使接收方无法从接收到的电磁辐射信号中解调出信号所携带的真实信息。由于相关干扰不依靠掩盖电磁辐射信号来进行干扰,因其发射功率无需很强,所以对环境的电磁污染也很小。相关干扰器使用简单、体积小巧、价格适宜、效果显著,最适合应用在单独工作的个人计算机上。

### (2) 建造电磁屏蔽室

屏蔽技术的原理是使用导电性能良好的金属网或金属板造成六个面的屏蔽室或屏蔽笼将产生电磁辐射的计算机设备包围起来并且良好接地,抑制和阻挡电磁波在空中传播。设计和安装良好的屏蔽室对电磁辐射的屏蔽效能比较好,能达到 60~90dB 以上。如美国研制的高性能的屏蔽室,其屏蔽效能对电场可达 100dB,对微波场可达 120dB,对磁场可达 100dB。妨碍屏蔽技术普遍应用的问题是屏蔽室的设计、安装、施工要求相当高,造价非常昂贵,一般二三十平方米场地的屏蔽室的造价即需几十至上百万元。因此屏蔽技术较为适用于一些保密等级要求较高、较重要的大型计算机设备或多台小型计算机集中放置的场合,如国防军事计算中心、大型的军事指挥所、情报机构的计算中心等。

### (3) 配置低辐射设备

TEMPEST 技术即低辐射技术。这种技术是在设计和生产计算机设备时,就已对可能产生电磁辐射的元器件、集成电路、连接线、显示器等采取了防辐射措施,把电磁辐射抑制到最低限度。生产和使用低辐射计算机设备是防止计算机电磁辐射泄密的较为根本的防护措施。国外一些先进的工业国家对 TEMPEST 技术的应用非常重视,在重要场合使用的计算机设备对辐射的要求都极为严格。国外已能生产出系列化的 TEMPEST 产品,如 TEMPEST 个人计算机、工作站、连接器、打印机、绘图仪、通信终端、视频显示器等。TEMPEST 产品造价非常高,一台 TEMPEST 设备要比具有同样性能的设备贵三至四倍。

### (4) 接受保密部门的技术检查

目前,国家保密部门已经制定了《电话机电磁泄漏发射限值和测试方法》、《信息设备电磁泄漏发射限值》、《使用现场的信息设备电磁泄漏发射检查测试方法和安全判据》、《处理涉密信息的电磁屏蔽室的技术要求和测试方法》四项保密标准,各部门使用的涉密信息设备应该由保密部门通过检测仪器进行技术检测,若发现问题,及时采取必要的措施堵塞漏洞,以防止国家秘密的泄露。

## 10.1.3 信息电子设备的雷电防护

防雷是一个老话题,但仍在不断发展中,应该说现在尚无万无一失的产品。防雷技术还有许多待探索的东西,由于雷电本身是小概率事件,需要大量长期的统计分析才能得到有益的结果,这需要各方的通力合作才能得以实现。

以微电子技术为基础的电子信息设备,因其集成度高、工作电压低、运算速度快,其耐过电压、过电流和抗雷电电磁脉冲(LEMP, Lighting ElectroMagnetic Pulse)的能力差,极易遭受雷电的危害,特别是雷电电磁脉冲造成的损害更为严重。因此,国际电工委员会将雷电灾害称为“信息时代的公害”。为了消除这一公害,人们进行了深入的理论研究和广泛的实践探索,研发了品

种繁多的电子信息系统的雷电防护产品，并从理论与实践的结合上不断完善电子信息系统的雷电防护工程技术。

一方面，由于电子信息设备十分“娇嫩”，对雷电电磁脉冲“十分”敏感。因此，它遭受感应雷击的概率比遭受直击雷袭击的概率高得多。在同样的雷电电磁环境下，其受损的概率也比建筑设施和一般的机电设备高得多。另一方面，由于电子信息设备的种类多、数量庞大、工作环境复杂、雷电侵入的通道多。因此，信息设备防雷遇到了比传统防雷复杂得多的问题。

对雷电电磁脉冲的防护应综合考虑雷电成灾的多种物理因素，针对雷电的各种耦合途径、耦合通道及其危害机理，采用相应的综合防雷技术和措施。

### 10.1.3.1 干扰途径与耦合机制

#### 1. 干扰途径

感应雷可由静电感应产生，也可由电磁感应产生，形成感应雷电压的概率很高，对建筑物内的弱电设备威胁巨大，计算机网络系统及电话程控交换机的防雷工作重点是防止感应雷的入侵。入侵计算机网络系统的雷电过电压及过电流主要有以下三个途径。

##### (1) 由交流电 220V 电源供电线路入侵

计算机系统的电源由电力线路输入室内，电力线路可能遭受直击雷和感应雷。直击雷击中高压电力线路，经过变压器耦合到 220V 低压，入侵计算机供电设备；另外，低压线路也可能被直击雷击中或感应过电压，在 220V 电源线上出现的雷电过电压平均可达 10 000V，对计算机网络系统可造成毁灭性打击。电源干扰进入设备的途径，一是电磁耦合；二是电容耦合；三是直接进入。

电源干扰复杂性中众多原因之一就是包含着众多的可变因素，电源干扰可以以共模或差模方式存在。共模干扰是指电源线与大地，或中性线与大地之间的电位差。差模干扰存在于电源相线与中性线之间，对三相电源来讲，还存在于相线与相线之间。电源干扰复杂性中的第二个原因是干扰情况可以从持续周期很短暂的尖峰干扰到全失电之间的变化。

##### (2) 由计算机通信线路入侵

可分为三种情况：

① 当地面突出物遭直击雷打击时，强雷电压将邻近土壤击穿，雷电流直接入侵到电缆外皮，进而击穿外皮，使高压入侵线路。

② 雷云对地面放电时，在线路上感应出上千伏的过电压，击坏与线路相连的电器设备，通过设备连线侵入通信线路。这种入侵沿通信线路传播，涉及面广，危害范围大。

③ 若通过一条多芯电缆连接不同来源的导线或者多条电缆平行铺设时，当某一导线被雷电击中时，会在相邻的导线感应出过电压，击坏低压电子设备。

##### (3) 地电位反击电压通过接地体入侵

雷击时强大的雷电流经过引下线和接地体泄入大地，在接地体附近呈放射型电位分布，若有连接电子设备的其他接地体靠近时，即产生高压地电位反击，入侵电压可高达数万伏。建筑物防直击雷的避雷引入了强大的雷电流通过引下线入地，在附近空间产生强大的电磁场变化，会在相邻的导线（包括电源线和信号线）上感应出雷电过电压，因此，建筑物避雷系统不但不能保护计算机，反而可能引入了雷电。计算机网络系统等设备的集成电路芯片耐压能力很弱，通常在 100V 以下，因此必须建立多层次的计算机防雷系统，层层防护，确保计算机特别是计算机网络系统的安全。



## 2. 耦合机制

雷电冲击影响微电子设备构成系统的耦合机制有下面几种。

(1) 电阻耦合 雷电放电将使受影响的物体相对于远端地的电位上升高达几百千伏，地电位升高形成的电流将分布到设备的金属部分。如连接到系统参考点数据线和电源电线。电缆屏蔽层的电流在屏蔽层与芯线之间引起过电压，其数值与传输阻抗成正比例。

(2) 磁耦合 在导体上流通的或处在雷电通道的雷电流会产生磁场，在几百米范围内，可以认为磁场的时间变化率与雷电电流时间变化率相同。然而，磁场经常被建筑材料和周围的物体所衰减和改变。磁场的变化会在室内外电缆设备上产生感应电流和电压。

(3) 电耦合 雷电通道下端的电荷会在附近产生一个很强的电场，它对鞭状天线设备有影响，而对于建筑物内部电场干扰一般可以忽略。

(4) 电磁耦合 远距离雷电放电产生的电磁场会在大范围的数据传输网上感应出过电压，这种干扰会传导到接口上，但这种情况下，直接辐射的电磁场很难对建筑物或机柜内的微电子设备造成破坏。

### 10.1.3.2 防雷原则和基本思路

#### 1. 雷电防护的基本原则

近十几年来，随着社会需求的拉动和理论探索的深入，信息防雷技术有了较大的发展。信息防雷是在闪电通道和避雷针泄流通道的及其周围整个三维空间内对雷电的全面防护，这是一个全新的思维。即不但要防直击雷，更重要的是防感应雷（雷电电磁脉冲）；不但要进行“路”的防护，更重要的是对“场”的防护。全面的信息防雷原则应为“整体设计、综合治理、系统实施”原则。

信息防雷是一个系统工程，任何单一措施的防护作用都是不全面的。正确的方法应首先对需要防雷保护的系统进行详细勘察，制订技术方案，并依据国家和有关行业的技术标准、规范，进行正规的工程设计。在此过程中，应从宏观到微观、从内部防雷到外部防雷、从天线到地线、从强电到弱电统筹考虑、系统设计。即对避雷针、地线、屏蔽、均压接地网络，以及雷电过电压容易侵入的通道，如电源系统、天馈系统、信号传输系统等有针对性地采取相应的技术措施，进行综合治理。施工过程中也应严格按照标准、规范和设计图纸实施。

#### 2. 雷电防护的基本思路

对雷电电磁脉冲容易入侵的所有通道，如电源线、天馈线和各种信号传输线等带电金属通道，除要求合理布线、严密屏蔽外，最简便、最经济的措施是分别加装避雷装置，以堵截雷电过电压。加装避雷装置的实质是使带电金属导体实现等电位均压连接。

##### (1) 弱电设备的外部防护

外部防护是指对安装弱电设备的建筑物本体的安全防护。第一，使用建筑物的避雷针将主要的雷电流引入大地；第二，在将雷电流引入大地的时候尽量将雷电流分流，避免造成过电压危害设备；第三，利用建筑物中的金属部件以及钢筋可以作为不规则的法拉第笼，起到一定的屏蔽作用，如果建筑物中的设备是低压电子逻辑系统、遥控、小功率信号电路的电器，则需要加装专门的屏蔽网，在整个屋面组成不大于  $5\text{m} \times 5\text{m}$ 、 $6\text{m} \times 4\text{m}$  的网格，所有均压环采用避雷带等电位连接；第四，建筑物各点的电位要均衡，避免由于电位要差危害设备；第五，保障建筑物有良好的接地，避免雷击建筑物时产生高接点电位损坏设备。

对处于不同雷暴日分区和不同设备的天馈系统，根据其工作频率、功率、阻抗等参数的不同，选择加装不同的天馈避雷装置。一般在室外端和室内与设备的接口端分两级设置。

## （2）弱电设备的内部保护

内部防护是指在建筑物内部弱电设备对过电压（雷电或电源系统内部过电压）的防护，其措施有等电位联结、屏蔽、保护隔离、合理布线和设置过电压保护器等措施。根据国际电工委员会的《防雷电磁脉冲（LEMP）》（IEC61312），信息防雷应根据雷电电磁脉冲的严重程度，将需要保护的空間划分为不同等级的雷电保护区（LPZ）。防雷保护区称电磁兼容分区，是按人、物和信息系统对雷电及雷电电磁脉冲的感受强度不同，把建筑物内、外电磁环境分成几个区域。

**LPZ0A 区：**本区内的各物体地都可能遭到直接雷击，因此各物体都可能导走全部雷电流，且本区内雷电电磁脉冲没有衰减。

**LPZ0B 区：**本区内的各物体不可能遭到直接雷击，但本区内雷电电磁脉冲也没有衰减。

**LPZ1 区：**本区内的各物体不可能遭到直接雷击，流往各导体的电流比 LPZ0B 区进一步减少。本区内雷电电磁脉冲经建筑物外墙的屏蔽而衰减。

在防雷保护区的 0 区与 1 区的界面上，对建筑物来说就是屋顶与四周墙壁及地面，尽管采用笼式避雷网结构，但由于受大网孔、门、窗口等开洞的影响，雷电电磁脉冲仍将通过多种耦合途径侵入保护区内，其感应电压也会破坏建筑物内部的电气和电子设备。

**LPZ2 区：**本区内的各物体不可能遭到直接雷击。雷电电磁脉冲经建筑物内墙的再次屏蔽而衰减。又称后续防雷区。如果需要进一步减小所导引的雷电流和电磁场，就应引入后续防雷区。应按照需要保护的系統所要求的电磁环境选择满足后续防雷区要求的条件。如建立专用的屏蔽室等。

机壳内部保护区序号越靠后，预期的干扰能量和干扰电压越低。在现代雷电防护技术中，划分防雷保护区的意义在于为内部防雷技术措施和有关防雷器件的选用提供电磁环境依据。

随着微电子设备的大规模应用，雷电以及操作瞬间过电压造成的危害越来越严重。以往的防护体系已不能满足微电子设备构成的网络系统对安全提出的要求。应从单纯一维防护转为三维防护，包括防直击雷，防感应雷电波侵入，防雷电电磁感应，防地电位反击以及操作瞬间过电压影响等，从多方面系统地综合地予以考虑。

## （3）电源部分防护

弱电设备的电源雷电侵害主要是通过线路侵入。高压部分有专用高压避雷装置，电力传输线把对地电压限制到小于 6 000V（IEEE C62.41），而线对线则无法控制。所以，对 380V 低压线路应进行过电压保护，按国家标准应有三部分：建议在高压变压器后端到二次低压设备的总配电盘间的电缆内芯线两端应对地加避雷器或保护器，作为一级保护；在二次低压设备的总配电盘至二次低压设备的配电箱间电缆内芯线两端应对地加装避雷器保护器，作为二级保护；在所有重要的、精密的设备以及 UPS 的前端应对地加装避雷器或保护器，作为三级保护。目的是用分流（限幅）技术即采用高吸收能量的分流设备（避雷器）将雷电过电压（脉冲）能量分流泄入大地，达到保护目的，所以，分流（限幅）技术中所采用的防护器的品质、性能的好坏是直接关系网络保护的关键所在，因此，选择合格优良的避雷器或保护器至关重要。同时，在施工中应严格遵从接线、接地和接熔丝的要求。

## （4）信号部分的保护

信号传输系统同样应根据雷暴日分区和防雷分区及不同的系统类型、系统结构、设备配置、工作电压、工作频率、传输速率及阻抗等，选择、加装不同的信号避雷装置。一般也需实行粗细两级保护。粗保护量级应根据所属保护区的级别确定，精细保护要根据电子设备的敏感度来进行确定。

### 10.1.3.3 雷电防护的一般措施

#### 1. 接闪

接闪,就是让在一定范围内出现的闪电能量按照人们设计的通道泄放到大地中去。地面信息设备的安全在很大程度上取决于能不能利用有效的接闪装置,把一定保护范围的闪电放电捕获到,纳入预先设计的对地泄放的合理途径之中。

##### (1) 避雷针

避雷针是一种主动式接闪装置,其英文原名是 Lightning Conductor,原意是闪电引导器,其功能就是把闪电电流引导泄入大地。1750 年,富兰克林提出以针尖放出电荷缓慢中和雷云中的电荷的避雷针用来防雷。不久,法国的一位工程师即按其理论建立了一个避雷针,并且很快发生一次接闪。这是人类首次主动设法改变雷闪途径,也是直击雷可以防护的证明。

避雷针的实际应用,必须解决的是它的保护范围问题。1925—1926 年,Peek 第一个在实验室内利用冲击电压发生器造成“人工雷”对避雷针模型放电,研究保护范围——保护系数与雷云高度对针高之比( $H/h$ )的关系,并研究了雷云极性对保护系数的影响。1930—1934 年,各国开始广泛利用避雷针保护发电厂和变电所。

采用避雷针是最首要、最基本的防雷措施。必要时采用各种经过实践检验的、对雷电流某一物理效应有明显效果的新型避雷针和优化避雷针,以降低雷电流陡度( $di/dr$ ),从而减小二次雷击的感应电压;或在条件允许、经济可承受的前提下,尽量降低接地电阻等。

##### (2) 避雷线

避雷线是在避雷针基础上发展起来的。避雷线的保护范围是这样确定的:当架构强度足够时,每保护水平距离 0.45m,避雷线悬挂高度要抬高 0.3m;架构强度受限制时,每保护水平距离 0.6m,要抬高 0.3m。这分别相当于保护角  $56^\circ$  和  $64^\circ$ 。我国 20 世纪 50 年代因担心避雷线断线会波及全厂和全变电所而只采用避雷针。到 20 世纪 70 年代中期,才明确避雷线可用于发电厂和变电所的保护。

##### (3) 避雷带

避雷带是在建筑物的屋脊和屋顶四周敷设的接地导体,是由避雷针、避雷线发展而来的。避雷网是在避雷带的中间敷设接地导体,以保护建筑物的中间部位。用于保护建筑物,其优点是敷设简便、造价低,而且同高耸的避雷针相比,引雷的概率大为减少。而且它接闪后一般是由多根引下线泄散电流,室内设备上的反击电压相对较低。我国建筑防雷工作者提出并在全中国广泛应用的笼型防雷方式则是利用建筑物钢筋形成的法拉第笼;它同时也解决了等电位连接问题,极大地提高了建筑防雷的可靠性。此外,它也便于笼内(屋内)电力、电信、电子设施统一接地(共地式)。

人们曾企图利用在针尖敷设上放射物质来提高引雷作用,扩大保护范围,后来证明无效;20 世纪 60 年代末、70 年代初,英、德等国建筑物防雷规范也已明确做出否定的结论。20 世纪 80 年代,水利电力部电力科学院在高压试验室内所做的试验也证明,放射性避雷针在引雷效果上与同尺寸的普通避雷针没有差别。我国过电压与绝缘配合标准对它一直持否定态度。尽管国际上已有定论,法国及一些法语国家还有一些地方,继续使用带有放射物的避雷针。我国一些从法语国家引进的工业设备,还有用这种避雷针保护的。这不仅浪费资金,无助于防雷改进,而且由于其上有放射性物质,还易造成人身及环境方面的隐患,违反了我国所有有关防雷的标准规定。

#### 2. 屏蔽

屏蔽,就是用金属网、箔、壳、管等导体把需要保护的物体包围起来,阻隔闪电的脉冲电磁场从空间入侵的通道。屏蔽是防止雷电电磁脉冲辐射对电子设备影响的最有效方法。

设备的屏蔽主要依赖其外壳。对于屏蔽要求很高的设备，应设置专用的屏蔽室。设备外壳和屏蔽室的屏蔽体都应良好接地。

电缆的屏蔽性能与电缆外导体或屏蔽体是否接地以及它的敷设形式有关。电缆敷设形式的不同，其屏蔽效果也大不相同，架空电缆比埋地电缆更易受雷电损坏。

### 3. 均压连接

接闪装置在捕获雷电时，引下线立即升高至高电位，会对防雷系统周围的尚处于地电位的导体产生旁侧闪络，并使其电位升高，进而对人员和设备构成危害。为了减少这种闪络危险，最简单的办法是采用均压环。

均压也称电位均衡连接（简称等电位连接）。就是把所有导体相互作用良好的导电性连接，并与接地系统连通。其中非带电导体直接用导线连接，带电导体通过避雷器连接。其本质是由可靠的接地系统、等电位连接用的金属导线、等电位连接器（即避雷器、地线隔离器）和所有导体组成一个电位补偿系统。

该电位补偿系统的作用，一是为雷电流提供低阻抗的连续通道，使其迅速导入大地泄放；二是使系统各部分不产生足以致损的电位差。即在瞬态现象存在的极短时间里，通过这个电位补偿系统可以迅速地在被保护系统所处区域内的所有导电部件之间建立起五个等电位区域。这个区域相对于外界可能存在着数十千伏的电位差。重要的是在需要保护的系统所处区域内部，所有导电部件之间不能存在显著的电位差，从而达到保护设备和人身安全的目的。

### 4. 接地

接地就是让已经纳入防雷系统的闪电能量泄放入大地，良好的接地才能有效地降低引下线上的电压，避免发生反击。过去有些规范要求电子设备单独接地，目的是防止电网中杂散电流或暂态电流干扰设备的正常工作。20世纪90年代以前，部队的通信导航装备以电子管器件为主，采用模拟通信方式，模拟通信对干扰特别敏感，为了抗干扰，所以都采取电源与通信接地分开的办法。现在，防雷工程领域不提倡单独接地。在IEC标准和ITU相关标准中都不提倡单独接地，美国标准IEEEStd1000—1992更尖锐地指出：不建议采用任何一种所谓分开的、独立的、计算机的、电子的或其他这类不正确的大地接地体作为设备接地导体的一个连接点。接地是防雷系统中最基础的环节。接地不好，所有防雷措施的防雷效果都不能发挥出来。防雷接地是“地面信息电子设备安装验收规范”中最基本的安全要求。

### 5. 分流

分流就是在一切从室外来的导线（包括电力电源线、电话线、信号线、天线的馈线等）与接地线之间并联一种适当的避雷器。当直接雷或感应雷在线路上产生的过电压波沿着这些导线进入室内或设备时，避雷器的电阻突然降低到低值，近于短路状态，将闪电电流分流入地。

分流是现代防雷技术中迅猛发展的重点，是防护各种电气电子设备的关键措施。近年来频繁出现的新形式雷害几乎都需要采用这种方式来解决。由于雷电流在分流之后，仍会有少部分沿导线进入设备，这对于不耐高压的微电子设备来说仍是很危险的，所以对于这类设备在导线进入机壳前应进行多级分流。

现在避雷器的研究与发展，也超出了分流的范围。有些避雷器可直接串联在信号线或天线的馈线上，它们能让有用信号顺畅通过，而对雷电过压波进行阻隔。

采用分流这一防雷措施时，应特别注意避雷器性能参数的选择，因为附加设施的安装或多或少地会影响系统的性能。比如信号避雷器的接入应不影响系统的传输速率；天馈避雷器在通带内的损耗要尽量小；若使用在定向设备上，不能导致定位误差。

将雷电流能量向大地泄放应符合层次性原则。层次性就是按照所划分的防雷保护区对雷电能

量分级泻放。由于雷电过电压的能量很大,单一的措施或一道防线都无法消除雷电过电压的侵害,必须采取多级防护措施才能将侵入的雷电过电压限制在安全的、设备能够承受的范围之内。许多行业的标准、规范中都规定在低压电源系统应安装多级避雷器,使雷电流分级泻放入地。各级避雷器的规格要与各级可能承担的雷电能量和各级设备的耐压配合。

以上是信息防雷工程的基本环节和主要工程措施,它们之间也是既相互独立又相互联系的。面对无孔不入的雷电电磁脉冲,所有有源或无源通道都是其入侵的途径。把加装几个避雷器就理解为信息防雷是很不全面的,把埋设或改善地线就理解为信息防雷更是错误的。信息防雷工程是现代防雷多项技术措施综合运用的系统工程。任何单方面的措施,所防雷效果都将大打折扣,所投资的效费比也将大幅降低。因此,信息系统防雷工程必须从全面考虑,做到层层防护,不留一丝隐患。

#### 10.1.3.4 直击雷的防护

直击雷防护,主要是使用避雷针、女儿墙避雷带、导地体和接地网,再加上主体钢筋而形成一种笼式框架即所谓“法拉第网”。这个笼式的框架,如要达到理想的效果,那么在没有避雷针的情况下,必须在最高部位布有不大于  $10\text{m} \times 20\text{m}$  的金属网格,如图 10-1 所示,整座建筑物的金属体如水管、铁门、天线等都要与这笼式框架联在一起,以达到最理想的防雷保护作用。

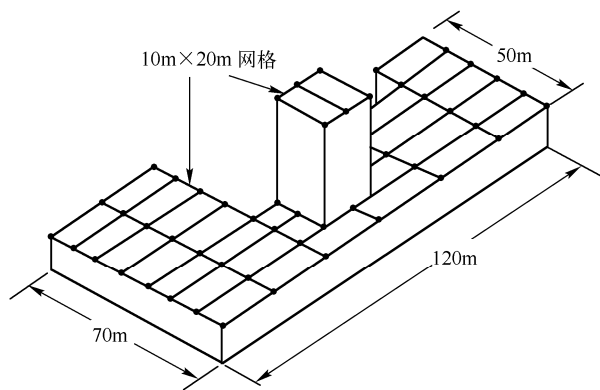


图 10-1 法拉第网

1752 年在富兰克林对避雷针的保护特性研究中发现,避雷针所能保护的会因建筑物的高度不同而受影响,在不超过  $20\text{m}$  高度的情况下,所有在其  $45^\circ$  角方圆范围内的物体都会得到保护,而随着高度的增加,保护范围会减少。

尽管避雷针对于电子信息设备有很多负作用,但是对它应抱着趋利避害、积极、稳妥的态度,采取有效的技术措施予以抑制。

#### 10.1.3.5 感应雷的防护

如前所述,感应雷主要是透过电源线、信号线或数据线入侵而破坏电子设备,所以感应雷的防护措施应该对建筑物的各类金属管、线上所产生的雷电脉冲起限制作用,从而保护建筑物内人员及各种电气设备的安全。采取的措施应根据各种设备的具体情况,除要有良好的接地与布线系统和安全距离外,还要按供电线路、电源线、信号线、通信线、馈线的情况安装相应的避雷器以及采取屏蔽措施。

如何决定是否要在某个地方安装防雷器,基本上可从以下因素考虑:

- (1) 设备所在的地方是否处于高雷击区且经常有雷电发生。
- (2) 设备本身的价值是否很高, 值得保护。
- (3) 设备一旦发生损坏, 是否容易导致人员伤亡。
- (4) 如设备本身价值不高, 那么一旦它遭雷电击坏后, 能否导致较严重的间接经济损失。
- (5) 接地网的设计及连接情况。
- (6) 设备的外接线路是否加有屏蔽, 并且远离建筑物的导地金属体。

防雷器必须具备以下条件:

- (1) 动作快: 小于 25ns。
- (2) 相容性: 它不会对其所保护的设备或线路造成任何干扰及中断。
- (3) 能承受高电流: 防雷器必须能承受 10kA 或以上的雷电电流。
- (4) 低“允通”电压: 能把 6 000V 的雷电冲击电压降到 600V, 是一般电子设备所能承受的范围, 即低于 700V。
- (5) 全面保护: 电源防雷器必须能提供相线对地线、中线对地线及相线对中线的全面保护。
- (6) 反复使用: 在正常使用情况下可承受多次感应雷击, 而自动恢复原始保护状态。
- (7) 寿命长: 经过老化测试能连续工作 20 年左右。
- (8) 安装简易。

电缆的屏蔽是一项很重要的技术措施, 它要求对机房内、外所有架空、埋地的电缆都用金属层屏蔽起来, 以防雷电电磁脉冲的干扰, 这称作全屏蔽。当全屏蔽电缆接触或穿过另一金属部分时, 还要采用中间接地点。因此, 全屏蔽电缆要求多点接地。对防感应雷设备应定期进行维护、检测、评估。

#### 10.1.3.6 浪涌防护设计

据统计, 约 75% 的现场微电子设备故障是由 EOS (电气过应力) 而引起的过电流或过电压造成的。因此, 电路设计人员应该注意导致 EOS 的原因, 并提供适当的电路保护以确保设备安全可靠地工作。系统设计人员应该清楚地了解每一个电子设备的电压和电流参数、以及特定电路和元器件的限制, 在系统中设计低成本的电路保护器件。

##### 1. 过流保护

现在可选择几种技术以提供过流保护, 这些技术包括传统的熔丝管 (玻璃或陶瓷型)、薄膜熔丝和基于聚合物的正温度系数 (PTC) 器件。

##### (1) 表面安装型熔丝

薄膜熔丝属于外形小巧类表面安装元件, 可为下一代电脑和电信、数据通信产品中的昂贵 IC 提供过流保护。典型的移动电路一般都有多个为昂贵的 VLSI 电路提供过流保护的薄膜熔丝, 这些熔丝工作于不同的额定电流和额定电压下。表面安装型熔丝 (SMF) 的典型封装尺寸为 1206 (3.2mm×1.6mm) 和 0603 (1.6mm×0.8mm)。这些熔丝的最大允许电流: 1206 型为 7A, 0603 型为 5A。这些片式熔丝可提供与电池组、移动电话、笔记本电脑、LCD 监视器、PDA 和调制解调器匹配良好的紧凑设计。当前用薄膜技术设计出的最小熔丝尺寸为 0402, 允许的电流范围从 250mA~2A。

##### (2) 通用模块型熔丝 (UMF)

市场上现有的熔丝均遵循 UL248 或 IEC 技术规格, 遵循 IEC127 标准设计的传统 5mm×20mm 熔丝管已得到 UL 认证, 并获得 UR (UL 认证) 证书, 尽管 IEC127—4 标准概述了通用模块型熔丝 (UMF) 的技术规格, 但目前市场上尚未得到任何 IEC 代理机构认证的表面安装型熔丝。NAN02

通用模块型熔丝是第一种满足 IEC127—4 规范的产品,其额定电压为 125V,额定电流可为 50mA、1A 和 1.6A。

### (3) PTC 可复位型保险

PTC 可复位型熔丝的工作原理,是在过流情况下通过调高自身电阻来保护电路免受损害的,一旦电流恢复正常,PTC 可复位熔丝能自动恢复到正常低阻值,并允许电流通过。这些特性使 PTC 可复位熔丝在电池供电的电子和数据通信应用中,成为理想的选择,因为在更换电池或插拔数据连接时可能会出现瞬间浪涌电流。PTC 可复位型熔丝通常在某些电路中取代传统的玻璃熔丝,并主要用于 USB。

### 2. PTC 可复位熔丝和普通熔丝选用

这两种熔丝都借助感应电路中过电流产生的热量来实现保护功能,普通熔丝借助熔化来中断电流,而 PTC 通过将低阻改变为高阻来限制电流。理解这两种类型器件之间的差异将有助于选择最好的电路保护器件。在选择过流保护器件时,通常考虑以下 4 个因素。

(1) 可复位性 两者最明显的差异在于 PTC 是可复位的,通常过流发生后采取的步骤是先断电,然后使器件冷却下来。

(2) 阻抗 产品技术规格显示,在额定值大致相同的情况下,PTC 具有熔丝 2 倍以上的阻抗。这个特性在设计用电池供电的设备时尤其突出,高阻抗器件增加的电能消耗不仅会缩短电池的寿命,而且还将导致更频繁的充电作业。

(3) 时间、电流特性 比较 PTC 和熔丝的时间、电流曲线图,PTC 的响应速度比普通熔丝要慢得多,而这一点对保护电路中异常敏感的部分特别关键。

(4) 尺寸 普通熔丝的功率密度比 PTC 大得多,高达 5A 的熔丝已可采用 0603 封装,2A 的则采用 0402 封装。最佳尺寸的表面安装型 PTC 的最大额定电流为 2A、6A,采用 1812 封装,业界主要制造商正在开发 1206 封装,并致力于增加电流承载能力。

### 3. 过压保护

在任何电子设备中都可能出现瞬态电压,它通常是由电路故障、雷击或 ESD 引发的。现在已开发出几种提供过电压电路保护的零配件,包括二极管、MOV、MLV、瞬态电压抑制器和 ESD 抑制器。

#### (1) 变阻器

金属氧化物变阻器(MOV)专为抑制汽车、电信和交流电源应用中的过电压而设计。MOV 是一种电压钳位元件,其阻抗与电压有关,如电压超过其阈值则其阻抗将变得非常小。MOV 具有高的  $V-I$  非线性特性,反应速度快,能承受很高峰值电流,待机状态下漏电流又较低。在敏感电路中安装的 MOV 器件可以将雷击带来的不利影响最小化。

多层变阻器(MLV)较小,是一种适合保护便携式和电脑设备中低电压电路的表面安装型无引线片式变阻器。同 MOV 一样,在电压超过其阈值时 MLV 就变得高度导电。MLV 可以具有不同的电压和电流额定范围,以满足各种应用要求,电容值仅为 10pF 的 0402MLV 在移动电路中得到了极好的应用。

典型的变阻器主要是为工作于 18V 或更低电压的电路板的应用设计的,这些表面安装器件通常应用在移动通信、电脑、医疗仪和便携式设备中。

#### (2) 瞬态电压抑制器

随着电子工业界不断探索提高效率和增加功能、降低产品成本和制造更紧凑便携式产品的方法,新的设计趋势是在单个封装中整合更多不同类型的元件,以提供完整的电路保护解决方案。

将过压、过流保护器件、过温、过压保护器件和 ESD 抑制器整合在一起的新产品正在开发之中, 它们将形成电路保护技术的又一次革命。瞬态电压抑制器是另一种选择, Surgector 就是其中之一, 它专为有线通信系统提供二级保护。Surgector 采用矽闸流技术以提供双向钳位保护, 该器件可用来吸收通信电路的瞬态波形和高峰值浪涌电流。Surgector 有双极性、单极性和编程式 SCR 3 种类型, 并采用表面安装、D0210AA 封装和直插式 TO-202 封装。

① ESD 抑制器。现代电子系统(不论是便携的、机载的, 还是陆基的)中的高密度电路, 都很容易受到静电或 ESD 的侵害。人体能产生超过 15kV 的 ESD, 因此为了有效防止 ESD 侵害, 要求许多新的电子设备必须满足 IEC61000—4—2 标准。传统的钳位二极管和多层变阻器(MLV)通常用来保护低速、高功耗固体电路。不过, 随着半导体制造技术的进步, 市场正向低电压、高速集成电路方向发展, 这些具有较大寄生电容的器件可能会导致信号传输失真。目前一种从聚合物正温度系数(PTC)技术发展而来的新器件, 具有处理经常出现在 IC 之间的较大 ESD 脉冲的性能。

静电(ESD)抑制器的聚合物结构使得制造商可生产出各种形状的 ESD 抑制器, 以满足各种不同应用的需要。该器件具有小于 1pF 的电容, 可提供良好的限制信号降级和衰减的性能, 以保证高速数据线和下一代电池组电路设计中的数据线能正常工作。

② TVS 管(瞬态电压抑制器)。当 TVS 管两极受到反向瞬态高能量冲击时, 它能以  $10^{-12}$ s 量级的速度, 将两极间的高阻抗变为低阻抗, 吸收高达数千瓦的浪涌功率, 使两极间的电压钳位于一个预定值(一般小于 2 倍额定工作电压), 有效地保护电子电路中的精密元器件免受各种浪涌脉冲的破坏。

TVS 管的显著特点为: 响应速度快( $10^{-12}$ s 级)、瞬时吸收功率大(数千瓦)、漏电流小( $10^{-9}$ A 级)、击穿电压偏差小、钳位电压较易控制、体积小等。它对保护装置免遭静电、雷电、操作过电压、断路器电弧重燃等各种电磁波干扰十分有效, 可有效地抑制共模、差模干扰, 是微电子设备过电压保护的首选器件。

#### 4. 综合浪涌保护系统组合

##### (1) 三级保护

对于自动化控制系统所需的浪涌保护应在系统设计中进行综合考虑, 针对自动化控制装置的特性, 应用于该系统的浪涌保护器基本上可以分为三级, 即对于自动化控制系统的供电设备来说, 需要雷击电流放电器、过压放电器以及终端设备保护器三级。数据通信和测控技术的接口电路, 比各终端的供电系统电路显然要灵敏得多, 所以必须对数据接口电路进行细保护。

自动化装置的供电设备的第一级保护采用的是雷击电流放电器, 它们不是安装在建筑物的进口处, 就是在总配电箱里。为保证后续设备不承受太高的剩余残压, 必须根据保护范围的性质, 安装第二级保护。在下级配电设施中安装过电压放电器, 作为二级保护措施。作为第三级保护是为了保护仪器设备, 采取的方法是把过电压放电器直接安装在仪器的前端。在不同等级的放电器之间, 必须遵守导线的最小长度规定。供电系统中雷击电流放电器与过压放电器之间的距离不得小于 10m, 过压放电器同仪器设备保护装置之间的导线距离则不应低于 5m。

##### (2) 三级保护器件

① 过电压放电器。充有惰性气体的过电压放电器是自动化控制系统中应用较广的一级浪涌保护器件。一般构造的这类放电器可以排放 20kA (8/20)  $\mu$ s 或者 2.5kA (10/350)  $\mu$ s 以内的瞬变电流。气体放电器的响应时间处于纳秒范围, 被广泛应用于远程通信领域。该器件的一个缺点是



它的触发特性与时间相关,其上升时间的瞬变量同触发特性曲线在几乎与时间轴平行的范围里相交,因而保护电平将同气体放电器额定电压相近。而特别快的瞬变量将同触发曲线在十倍于气体放电器额定电压的工作点相交,也就是说,如果某个气体放电器的最小额定电压 90V,那么线路中剩余的残压可高达 900V。它的另一个缺点是可能会产生后续电流。在气体放电器被触发的情况下,尤其是在阻抗低、电压超过 24V 的电路中会出现下列情况,即原来希望维持几个毫秒的短路状态,会因为该气体放电器继续保持下去,由此引起的后果可能是该放电器在几分之一秒的时间内爆碎。所以在应用气体放电器的过电压保护电路中应该串联一个熔断器,使得这种电路中的电流很快地被中断。

② 压敏电阻。它被广泛作为系统中的二级保护器件,因压敏电阻在纳秒时间范围内具有更快的响应时间,不会产生后续电流问题。在测控设备的保护电路中,压敏电阻可以用于放电电流为  $2.5 \sim 5\text{kA}$  ( $8/20$ )  $\mu\text{s}$  的中级保护装置。压敏电阻的缺点是老化和较高的电容问题,老化是指压敏电阻中二极管的 PN 部分,在通常过载情况下,PN 结会造成短路,其漏电流将因此而增大,其值大小取决于过载的频繁程度。若被应用于灵敏的测量电路中将造成测量失真,并且器件易发热。压敏电阻大电容问题使它在许多场合不能应用于高频信息传输线路,这些电容将同导线的电感一起形成低通环节,从而对信号产生严重的阻尼作用。不过,在 30kHz 以下的频率范围内,这一阻尼作用是可以忽略的。

③ 抑制二极管。它一般用于高灵敏的电子回路,其响应时间可达  $10^{-12}\text{s}$  级,而器件的限压值可达额定电压的 1.8 倍。其主要缺点是电流负荷能力很弱、电容相对较高,器件自身的电容随着器件额定电压的变化而变化,即器件额定电压越低,电容则越大;这个电容也会同相连的导线中的电感构成低通环节,而对数据传输产生阻尼作用,阻尼程度与电路中的信号频率相关。

### 10.1.3.7 电缆防雷设计

#### 1. 地下电缆的防雷

为了增强地下电缆的防雷能力,常采用下列防护措施:

##### (1) 地下防雷线

地下电缆的防雷线,是用两根镀锌钢线平行埋设在电缆的上方约 0.3m 处,两钢线彼此相隔 0.4~0.6m。不另做接地装置,也不与电线相连接。

##### (2) 消弧线

当地下电缆与单棵大树(高度在 6m 以上)、电杆、高塔或其他高耸建筑以及地下水出口处的隔距太小时,可采用消弧线保护电缆。消弧线能够降低电缆和大树等物之间的电位差,能防止大树被雷击后在树根与电缆之间发生电弧击穿现象,从而达到保护电缆的目的。

消弧线安装在电线与大树等物体之间,做成半圆弧形包围大树等物的一侧,一根与电缆埋深相同,另一根为电缆埋深的一半。各层线的两端都要焊连在接地装置上,接地装置设在远离电缆的一侧。

##### (3) 系统接地

有绝缘外护套的电缆线路,宜每隔 2km 左右做一处保护性接地。雷害严重的地段,间隔可适当缩短。

##### (4) 均压线

同一沟内有几条电缆时,可把它们金属外皮和钢带用均压线并联焊接在一起。这样可以提高电缆的防雷能力,也可消除电线之间由于存在电位差而引起的电解腐蚀。

### (5) 防雷电缆

除以上措施外,在雷害严重地区还可采用防雷电缆。对于金属缆皮与大地均匀接触的电缆而言,为保证芯线与外皮之间的绝缘介质不被击穿,为了提高电流的容许值,就应提高绝缘介质的耐压强度,并应减小缆皮电阻。为了提高绝缘介质的耐压强度,可在金属护层内包两层聚乙烯带,耐冲击电压可达 100kV。

雷击电缆会使金属护层与大地击穿,造成塑料外层出现针孔、金属外皮受到腐蚀。为了防止这种现象,可在金属皮的外面加半导体的外护层。这样在雷击时由于外护层是导电的,可把雷电流引入大地,同时也有一定的防蚀性能。

另外,采用双金属护层也可提高电缆的防雷性能。双金属护层就是在电缆外面再加一层屏蔽层(如绕包铜带等)以减少雷击故障。双金属护层电缆由于耗铜较多,只适用于特殊防雷地段。

## 2. 架空明线线路的防雷措施

### (1) 防止雷击断线

从理论上说,增加导线线径或在导线上加装架空地线可使导线在雷击时免遭断线。但在全长加大导线线径或装架空地线将增加大量投资,不宜采用。实际中,一般只在个别多雷或经常发生雷击断线的地区才采取加装架空地线的措施(个别地区加大导线直径是不允许的,否则将影响传输质量)。架空地线的高度一般高出导线即可。

### (2) 防止雷击隔电子

隔电子被击是由于过电压所致,故在一些雷电频繁或线路经常遭受雷击的地区分别装设一处、二处甚至三处 1.5~2.0cm 放电间隙或 R-250 陶瓷放电器,及时将导线上的过电压导入大地,从而保护了隔电子,其效果还是显著的。但放电间隙也不宜装设过多。

### (3) 防止雷击木杆

一般只有直击雷才能损坏木杆,而直击雷机会较少,因此只在一些结构比较复杂、杆上设备比较重要的电杆上才装避雷线。对于已经遭受过雷击的电杆处,在修复后一定要装避雷线。如与 3 000V 以上的电力线交越,杆身地线要留有 5cm 的间隙,以保证杆上人员的安全。

### (4) 防止进局终端设备遭受雷击

① 在终端杆上装设保安器。这种保安器是由放电器、熔丝、0.3mm 火花放电间隙、底座所组成。它能使终端设备、进局电缆以及局内机械及人身免遭外界电磁能的损坏和危害。

现在常用的放电器是 R-250 型放电器。当外来电压,未超过它的放电电压时,它是良好的绝缘体,当外来电压超过它的放电电压时,管内气体将游离导电,使它变为良好的导体。电压去除后,它又能很快恢复到原来状态(放电前的绝缘状态)。它的作用是防止进局设备、电缆以及局内机械及人身遭受危险电压的影响。它可将危险的过电压部分或大部分导入地。

熔丝装置在放电器之前,其作用是防止大电流长久地通过放电器,使放电器免遭损坏。0.3mm 火花放电间隙装于保安器的最前面(靠近明线侧),其工频放电电压约为 2~2.5kV。其作用是:当熔丝熔断后,或在放电器损坏时(开路状态),可将线路上来的过电压部分或大部分入地;当线路传来的过电压波头很陡放电器来不及放电时,它可将此过电压部分或大部分入地;此外,在一些情况下,它将与放电器并联放电,从而在一定程度上使放电器免遭损坏。

② 在终端进局一段电线上装置架空地线。它的作用除了防止架空明线杆路(进局的一段)直接遭受雷击外,还防止雷击明线的特大过电压袭击终端,架空地线的总长度在 200~270m 左右,其接地电阻一般为 20 $\Omega$ ,在终端杆及分级保护杆处架空地线一般不得入地。

③ 分级保护。在终端杆前方,每隔一定的距离装置放电间隙或 R-250 陶瓷放电器(即分级

保护)。将导线前方传来的过电压逐渐阻挡(衰减),以减轻终端保安器的负担,从而提高通信保护的可靠性并防止终端保安器(熔丝、放电器)遭受特大过电压而被损坏。

### 10.1.3.8 移动通信基站的雷击防护

蜂窝式无线电通信系统为了提高通信质量,要大量架设基站用来提高信号的覆盖率。无线基站的特点使其处在最易于受到雷击损害的高风险地带。一方面,无线基站不可能完全选择在电气保护完好的建筑物内。这是因为基站必须符合架设的地点要求,这样才能完全使基站用于提高信号覆盖率;另一方面,由于无线通信的基站(GSM、CDMA 以及小灵通的基站)除了供电系统易受雷击的损害之外,它的射频部分即射频电缆一般都是由室外天线引入,同样是雷击的破坏点。从雷电防护角度来看,基站有多点暴露在雷击的危害之下,必须采取强有力的防护措施。如果不加以防护,一旦遭受雷击,轻则造成基站系统失效,重则造成系统的损坏。无论是失效还是损坏都可能给无线通信造成不可估量的损失,对于运营商来说不但是经济上的损失,更重要的是信誉上的损失。

无线基站的防护主要从两个方面入手。首先是交流供电电源部分的防护。无论基站设在城市市区还是设在乡村,通常都是设在租用的建筑物内,而这些建筑物不可能完全按照电信设施的要求提供必要的防雷措施,例如,外部防雷、内部防雷以及良好的地网等。同时由于费用方面的原因,基站所租用的机房面积较小,不太适合采用两级或多级防雷措施。根据目前的情况,可以利用大多数基站在开关电源设备中配备一级防雷器。具体的做法是在交流配电柜的前面或后面安装一级防雷器,并且使这一级的电流容量大于后一级,同时其容量大小应根据当地的雷电资料和被保护机房的具体情况(特别是对雷害的暴露程度而定)适当地进行调整。对于中等以上雷暴强度地区(年均雷暴日 40 天以上),最好用最大通流容量大于 100kA 的防雷器作为第一级防雷,而且第一级应能将残压降到 900V 以下,这样就能充分保证基站设备的可靠运行。

其次是射频电缆部分的防护。射频电缆是基站天线和基站设备联系的途径,也应是雷击防护的重点。一般来讲射频电缆的防护较之交流供电电源部分的防护更为重要,这是因为一般基站的射频输入端都相当脆弱,对雷击非常敏感;同时雷击产生的寄生传导干扰还可能造成基站设备控制部分的失效,同样会使整个基站系统瘫痪。因此,有必要采用专门的射频电缆雷击防护产品,有效地将这种损害降到最低。

移动基站是由电源系统、接收发射系统、天馈线系统、中继传输系统等构成的一个综合系统,防雷的目的是保证各系统都能正常工作,不受雷电的干扰和破坏。基站所处环境的不同,雷击的季节和强度都不一样,所以将需要保护的基站作为一个整体,堵塞所有的雷击入侵渠道,实行分区和等电位连接的原则,在工程实施中按规范执行,才能起到全面的保护效果。

### 10.1.3.9 单位进行雷电防护的措施

(1) 单位应定期由专业防雷公司检测防雷设施,评估防雷设施是否符合国家规范的要求,比如,学校、公司、区级以上医院、四星级以上宾馆、城区内高度在 45 米以上的高层建筑需两年检测一次。

(2) 单位应设立防范雷电灾害责任人,负责防雷安全工作,制定各项防雷安全措施,建立各项防雷设施的定期检测、登记,雷雨后的检查和日常的维护。例如,雷雨过后,检查安装在电话程控交换机、电脑等电器设备电源上和信号线上的过压保护器有无损坏,发现损坏时应及时更换。

(3) 建设及施工部门在防雷设施的设计和建设时,应根据地质、土壤、气象、环境、被保护物的特点,雷电活动规律等因素综合考虑,采用安全可靠、技术先进、经济合理的设计与施工。

(4) 应采用技术和质量均符合国家标准的防雷设备、器件、器材,避免使用非标准防雷产品和器件。

(5) 对新增加建设和新增加安装设备,应同时对防雷系统进行重新设计和建设,例如,重新铺设电脑网络线、室外天线的移位和加高等都应该重新设计和建设防雷设施。

(6) 雷灾发生后应及时处理,采取措施,避免再次遭受雷击。

### 10.1.4 计算机干扰防护设计

电子计算机是一种用电子器件构成的、能够自动高速地进行大量计算工作的电子设备,其硬件主要由中央处理单元 CPU、存储器、输入/输出接口、总线和输入/输出设备五部分组成,所以确切地说,应该叫做电子计算机系统。

当前,计算机已经普遍地应用在工业、农业、国防、科技、教育、管理等各个领域,家庭和个人使用计算机的情况也逐步普及。现在的计算机系统几乎全部由集成电路、大规模集成电路和超大规模集成电路组成,在电路设计阶段就妥善地考虑了各部分电路之间的抗干扰问题。用于生产过程控制的过程输入/输出模板和各种接口电路也已有周密的抗干扰措施;种类繁多的输入/输出设备,如打印机、CRT、磁带机、磁盘驱动器等的抗干扰性能也都不断提高,已能适应自动控制的要求。总而言之,在一般条件下,计算机系统本身,即硬件设备的抗干扰性能已基本满足使用的要求,尤其是在计算中心和办公室等电磁环境好的地方。

然而也应该看到,随着计算机应用可靠性的不断提高,计算机应用范围也在迅速扩大,尤其是微型计算机的迅速发展,加快了它在各种生产部门的应用。工业化的大生产,对自动化水平要求更高,一个大型工业自动化系统,要求使用的计算机台数会大量增加,因此,计算机通信系统也日趋复杂,有时要求在大规模的生产现场,实现视频信号、语音信号、数据信号等的高速通信,有时还包括无线电通信装置。大型自动化系统中所使用的各种类型的计算机,有的是集中安装在中央控制室;有的是安装在生产现场的各单机设备上;有些智能化仪表和各种电子仪表就直接安装在生产现场。它们大多处在强电电路和强电设备所形成的恶劣电磁环境中。

计算机的防干扰问题具有一般电子设备的共性,又有其突出的特点。它既是一个敏感设备又是一个干扰源。计算机控制系统中的计算机工作时,常受到外部和内部的电气干扰,如静电感应、电磁感应、漏电流、接触电位差、接地电位差等。因此,在设计、安装、调试和维护计算机控制系统的过程中,必须考虑下述六个方面:

- (1) 抗干扰的优质电源系统。
- (2) 适宜的接地方式。
- (3) 科学的信号线配置。
- (4) 有效且经济的抑制电磁干扰措施。
- (5) 高效的软件抗干扰措施。
- (6) 符合抗干扰要求的机房设施。

#### 10.1.4.1 计算机中的干扰

计算机作为一种数据处理和存储系统,外界电磁场干扰可能对其正常运行和信息安全造成危

害；它是低电平电子系统，主要电路是数字电路；数字电路的逻辑元件都有一定的阈值电平和与之相对应的干扰容限，因而它不会响应低于容限的干扰，但对其所受到的高于容限的干扰破坏却没有恢复功能。计算机主要由脉冲数字电路和工作于开关状态的电路组成，所处理的是脉冲信号，因而易受外界脉冲干扰的影响，同时，它也向外界发送脉冲干扰。脉冲信号具有很宽的频谱，计算机的主频也有很宽的范围，包括长波、中波、短波、米波及分米波等很宽的波段与电力电子设备、广播、电视、通信、雷达等的基本工作波段相同，因而计算机工作在一个相当复杂的电磁环境之中。目前，计算机向高速、宽带、高密度、小型化发展，由此也可能会导致更加严重的干扰问题，给计算机防干扰带来更多急待解决的难题。

计算机的外界干扰，其主要来源是射频干扰、工频电源干扰、静电干扰及雷电脉冲干扰等四类。若计算机房处于大功率无线电发射设备、高频大电流设备或射频理疗设备等附近，计算机的工作将受到严重干扰。在电磁干扰环境中，计算机所受到的危害取决于干扰场强、频率和计算机自身的电磁敏感度。实验证实，在离计算机 6m 处开关电流为 10A 的交流感性负载，其接触器触头电弧产生的干扰足以使计算机产生误动作。

计算机的寄生辐射和传导所造成的电磁泄漏具有很宽的频谱，它一方面是外部敏感设备的噪声源；另一方面也容易造成计算机自身数据信息的泄密和失窃。测试结果表明，CPU、内存、I/O 接口、时钟、视频、字库、传输线、电源线等部位都有较强的电磁辐射，一般辐射约  $40\sim 80\text{dB}\mu\text{V}$ ，最高可达  $75\text{dB}\mu\text{V}$ ，用灵敏度较高的接收机或电视机在几百米之外就可有效地截收显示器的显示信号。在低频段，数字时钟谐波次数低、信号较强，更易截收显示器视频显示信息。计算机显示信息泄漏的主要途径是显示控制器与显示器之间的接口传输电缆所产生的辐射。

工频电源电压的大幅度波动或电流冲击有可能通过电源线进入计算机系统，使计算机出现运行错误或故障，甚至破坏计算机的某些部件。此外，某些电器设备产生的尖峰干扰脉冲、工业火花等也可通过供电线路进入计算机。例如，开关电传机可产生 1000V 的尖峰脉冲，它足以损坏某些部件。研究表明，工频电源干扰和通过电源线的射频干扰十分严重。

静电干扰是造成计算机中 MOS 电路损坏的主要原因。美国由于静电导致计算机及其元器件的损坏造成的经济损失每年高达数亿美元。雷电脉冲通常通过电网供电电源进入计算机造成干扰，甚至使计算机或其部件损坏。在我国，由于雷电而致使计算机损坏的事例屡见不鲜。

一般数字电路的工作电平，理论上高电平为 5V，低电平为 0V，实际上高电平为 3.2V 以上，低电平为 1.4V 以下，如图 10-2 所示。

高低电平的差值最小只有 1V。电源电网中的很多干扰信号的幅度足以使数字电路混乱发生逻辑，图 10-2 (b) 所示为电源中的瞬态干扰，这种干扰能通过变压器、整流和稳压电路进入数字电路。如实验室同一电源插板上的某负载关闭，它在电源中引起的瞬态尖峰干扰进入正在调试的单片机就会使计算机发

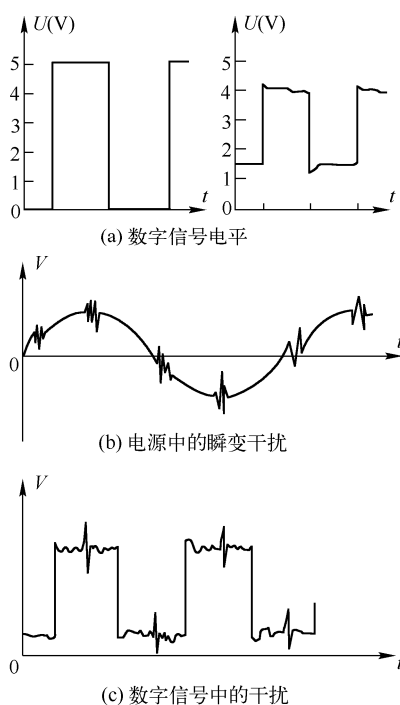


图 10-2 数字信号中的干扰

生“死机”，或程序数据被冲掉。这是因为电源中的瞬态干扰通过普通单板机 5V 稳压电源进入 CPU 和存储器引起电平翻转而造成的逻辑和时序混乱。

计算机控制系统受到交直流噪声干扰后，经常出现的故障有下面几种：

(1) CPU 误动作或停机

由于系统中侵入了噪声，CPU 执行程序紊乱，输出控制出错，甚至不能运算而停机。

(2) 程序异常

噪声改变了存储器（通常是 RAM）中的信息数据，从而使程序发生变化，以致不能进行正常运算。一般可以通过存储器奇偶校验、和数校验、指令机器码校验等多种检查办法检查出异常的信息数据。

(3) 外部设备误动作

当 CPU 接上外部设备（如 CRT 显示器等）后，CPU 最敏感的信号线（如数据线、中断线等）很可能受到外界影响，如果有噪声侵入这些敏感线路，则 CPU 和外部设备都有可能出现误动作。

(4) 控制瞬时失效

由于噪声或瞬时断电的影响，CPU 有可能突然停止运算或瞬间停止控制，然后又继续运行，从而出现错误的或虚假的控制命令等。

(5) 误输入

由于噪声感应电压叠加在输入信号上输入计算机，经计算机运算判断后而输出错误信号，对后面的功能单元产生严重影响。

(6) 输出误动作

当输出口寄存器受干扰而动作时会使输出信息出错，导致输出设备误动作，往往造成较大影响。

#### 10.1.4.2 计算机抗干扰的一般措施

提高计算机系统的抗干扰能力的措施概括起来有几个方面。首先，从硬件、软件设计着手提高系统的抗干扰能力。在硬件设计中要进行 EMC 设计，综合采取各种抗干扰措施；在软件设计中，冗余技术、容错技术、标志技术、数字滤波技术等都是行之有效的方法；逻辑电路技术与软件技术的巧妙结合，可以用来作为抑制噪声的有力工具。其次，屏蔽接地是提高计算机抗干扰能力的又一有力措施，屏蔽包括机房屏蔽、整机屏蔽、元部件之间的屏蔽和隔离，电源的进线及传输线、数据的输入及输出线也应屏蔽接地。系统与机房不仅要有良好的接地，而且应有针对性地对交直流接地、高频接地、防雷接地和安全接地进行合理设计。此外，滤波也是抑制传导耦合干扰的重要方法，电源线滤波器可以显著降低来自供电网的干扰，在屏蔽体的出入口或导线的适当位置安装滤波电路也是非常必要的。采用光技术能传输高密度信息，不易受电磁感应噪声影响，是提高计算机抗干扰能力的又一途径。

由于工业计算机的现场环境中到处存在着噪声，所以最根本的办法应该是从最初设计计算机控制系统起便采取充分的噪声抑制措施，通常可从以下几方面着手。

(1) 抑制瞬变噪声源

一要注意电气部件动作时的瞬态电流变化，例如，接通交流接触器、交流电动机等设备时，冲击电流可达额定电流的 5~10 倍，应采取相应的抑制冲击电流的有效措施；二要注意瞬变电压的影响，如前所述，在切断交直流感性负载时都会产生瞬变电压，其幅值可高达几千伏，它所含的高频分量对电源线和信号线都会产生严重干扰。

## （2）抑制电源噪声

抑制电源噪声有多种办法，其中最重要和最常用的办法是用线路滤波器消除电源脉冲噪声的高频分量，可以显著降低来自供电网的干扰；用隔离变压器隔离一次、二次侧感应噪声的传输；用尽量短的双绞线进行配线等。

## （3）切断噪声传输途径

输入/输出接口电路大多经配线与分布在各处的设备或器件交换模拟量和数字量信号。为避免长距离传输过程中受静电感应和电磁感应噪声的干扰，除设法减少配线间的静电电容外，还要降低输入阻抗。要根据实际情况，分别采用屏蔽线、双绞线，并要设法避免长距离平行配线，必要时取垂直交叉走线方式，以及输入/输出信号线分槽布置等。在屏蔽体的出入口或导线的适当位置安装滤波电路也是非常必要的。

## （4）良好的接地系统

屏蔽接地是提高计算机抗干扰能力的有力措施，应有针对性地对交直流接地、高频接地、防雷接地和安全接地进行合理设计。这里需要特别注意安全接地必须与系统接地分开的问题。设计较小型装置时，通常多用机壳地兼作信号地，这样做，不仅设计容易，装置的工作状态也比较稳定。但是对于计算机控制的大型系统，采用上述接地方法会出现若干新问题，如易形成接地环路、易受磁场和地电位差的影响等，因此，在较大型的计算机控制设备中，以将安全接地与系统接地分开为宜。

## （5）利用软件设计实现抗干扰的措施

在软件设计中，冗余技术、容错技术、数字滤波技术等都是有效的方法。

## （6）硬件冗余

提高计算机系统可靠性的良策之一是使存储器、输入/输出接口等有一定的冗余度。冗余度可体现在两方面，即硬件冗余和软件冗余。所谓硬件冗余是指所用元件或电路实行多重化，在电路设计中可采用下面多种方式：一种是并联冗余，即把几台设备、电路或元件并联，使之同时动作，只要不是所有设备、电路或元件同时出现故障，便能保证电路顺利工作；再一种是待机冗余，工作元件或电路发生故障，立即切换到冗余设备或电路上，从而使系统继续运行；还有一种是多数表决冗余，即按照多数表决的原则，将三个以上的元件或电路并联起来，只要它们的输出状态相同者多于约定数，便认为电路正常，例如  $2/3$  系统是三个中有两个相同时，便以该两者的结论为准。

硬件冗余级别很多，大至系统（如双机系统），小至器件，多种多样，总目的都是为了提高各级工作的可靠性。

此外，采用光技术能传输高密度信息，不易受电磁感应噪声影响，是提高计算机抗干扰能力的又一途径。

### 10.1.4.3 计算机电网干扰的抑制

#### 1. 差模及谐波干扰的抑制

一般情况下，综合运用屏蔽、接地、搭接和滤波几种措施，对电源线中常见的共模和差模干扰都能收到较好的效果。但对用于现场实时控制的计算机而言，虽然采取了种种措施，往往还会出现程序受干扰和数据丢失的现象。

电源线传导干扰的传播途径见图 10-3。输电线上不可避免地会捡拾到各种高频辐射干扰，这种干扰往往以共模形式出现，经过超级隔离变压器及电源滤波器后都有较大的衰减，对计算机的

危害并不大。

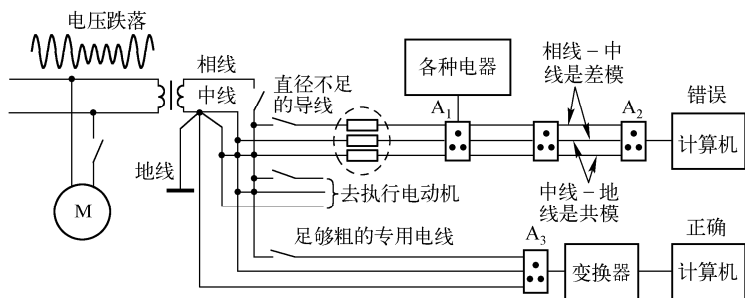


图 10-3 电源配电线中的传导干扰

对计算机危害严重的是差模干扰。例如，并联在同一电网上的电动机（图 10-3 中 M）启动，或计算机机房内其他电器及受计算机控制的执行电动机动作时，都有可能在电源线上产生低频干扰，如 50Hz 波形短时间跌落或谐波失真。由于这类低频干扰是叠加在 50Hz 电源波形上、随同电源波形一起传播的，滤波对这类干扰收效不大，称为差模干扰。

开关电源电路仅在电源接近波峰的瞬间才导通，在导通瞬间从电网超常吸收电流给直流电源的电容器充电。总之，计算机开关电源充电期间电源线压降比普通同功率连续用电器的压降大得多。更为严重的是当开关电源无功功率系数校正（PFC）电路、开关晶闸管导通角小于  $70^\circ$  时，将向电网汲取大量的奇次谐波，造成电网波形失真。一旦电网因重负载启动出现上述差模干扰，即使 50Hz 电源电压仅有几个周期跌落，计算机峰值整流器直流输出线上也会在此期间出现强瞬态电压，造成计算机程序出错。

由于一般配电线都是按连续波供电来计算供电线直径的，若计算机电源线亦照此办理，那么计算机充电时线路压降要比同功率连续波供电时大若干倍。倘若将其与室内其他用电器接在同一条线路上（图 10-3 中 A<sub>2</sub>），计算机受差模干扰的危害就更为严重。计算机电网线不但线径要远大于常规电器供电线路的规格，而且电源线应由配电板单独引出（图 10-3 中 A<sub>3</sub>）。

在计算机电源线路中接入快速反应的电源变换器，可使电源波形跌落限制在四分之一周期以内。隔离变压器尽管能抑制高频干扰，但它含有惯性大的铁磁性元件，波形失真大、效率低、反应速度慢，有时不但没有抑制尖峰差模干扰，反而加剧其干扰危害。

对于大型计算机来说，为解决这类差模干扰，有时交流供电采用了“市电→电动发电机组（甚至带有惯性飞轮储能）→静态稳频稳压装置”这一方案，它既可使计算机的地线系统与电网彻底隔离，又可利用飞轮惯性储藏的机械能补偿电网波形短时间跌落。

中小型计算机配用不间断电源，除对付电网突然停电外，也能部分抑制电网干扰。

## 2. 浪涌和快速脉冲群干扰的抑制

电网中除差模干扰之外，还广泛存在着由电力电子和各种开关继电器切换（包括激光气体放电）时向电网倒灌的瞬态干扰，最典型的是浪涌、快速脉冲群及瞬态阻尼正弦信号。对这类干扰，常规的屏蔽、接地、滤波措施收效可能不大。浪涌的单次脉冲幅度通常在千伏以上、持续时间达数百微秒，能量大。它可使电子设备受到瞬态过电压的破坏。每年半导体器件的集成化都在提高，元件的间距在减小，半导体的厚度也在变薄。这使得电子设备受到瞬态过电压破坏的可能性越来越大。如果一个浪涌导致的瞬态过电压超过一个电器设备的承受能力，那么这个电器元件或设备或者被完全破坏，或者使用寿命大大缩短。



每一次电力公司切换负载而引起的浪涌都缩短各种计算机、通信设备、仪器仪表和 PLC 的使用寿命。另外,雷电、大型电机设备、电梯、发电机、空调、制冷设备等也会引发浪涌。UPS 也可能被浪涌摧毁。

建筑物顶部的接闪器在防直击雷时可将大部分的放电分流入地,避免建筑物的严重损坏。UPS 不间断电源处理电压的严重下降。二者非常有用,但都不能保护计算机免受浪涌的破坏,而且 UPS 本身集中使用了很多微处理器,也有可能被浪涌摧毁。

电气设备机房的浪涌过压及电磁干扰的防护,是保证正常办公、生产、电气设备及人身安全的重要技术手段,是确保精密电子设备运行和信息网络正常运行不可缺少的技术环节。在日常办公和经营活动中的重要作用变得越来越突出和重要。IEC/TC77 制定的标准中已经专门给机电产品规定了对浪涌和快速脉冲群干扰的考核试验。

快速脉冲群干扰的脉冲幅度也可达数千伏。每组脉冲串的重复频率虽然低于 1MHz,但单个脉冲的上升时间 5ns,频谱延伸到 200MHz 以上。对这类干扰的抑制措施重点在高频段:在电源线及信号互连线加配铁氧体吸收器;在线路板设计时注意高、低频分区,加强高频滤波措施。

### (1) 浪涌防护原理

浪涌防护采用浪涌防护器,浪涌不能被阻止,因为它包含的能量太强。正是由于这种原因,保护敏感电气设备免受浪涌损坏的策略是把浪涌从设备分流。理想的浪涌防护器在电力线上应是觉察不到的,而当电压达到一定的限值时,应立即动作,分流多余的能量入地。

“火花间隙”技术的意图是同样的,该技术的核心是两个电极,形状像牛角,由绝缘材料分开,彼此间有很短的距离。火花间隙的工作原理和雷电的工作原理一样,当两个角型的电极间电位差达到一定程度时,电荷穿过两个角型的空间打火放电,并给放电提供了入地的通路。

使用火花间隙技术对付浪涌犹如用火来对付火。来自世界著名的采用火花间隙技术的生产厂家的安装指南中提醒使用者“每当使用火花间隙技术的浪涌防护器动作时,热量和压力从防护器的尾部释放出来”。并提醒用户:由此产生的热量和压力可能产生短路或火灾。由于该原因和其他原因,IEC61643—1 安全规范要求采用火花间隙技术的浪涌防护器配有一个限制保险( $F_2$ ),在系统保险( $F_1$ )工作前, $F_2$ 将熔断。这种增加的保险极大地降低了火花间隙技术的浪涌防护器可能处理过电流的能力。实际上,增加该保险的容量决定了火花间隙技术浪涌防护器的电流处理能力。

### (2) 电气设备机房浪涌防护措施分析

① 安装了直击雷防雷设备的浪涌防护不可忽视。直击雷防雷设备的作用是接闪,即防止雷电直接击中机房所在建筑物以及接闪器保护范围内的各种金属管线和用电设备。对于在接闪器保护范围外的各种金属导线以及由直击雷所产生的感应雷电和建筑物内所产生的内部浪涌是不能保护的。对于由电力故障所产生的部分外部浪涌也是不能保护的。这包括高压/低压动力电源线、部分网络和专用数据通信线被雷电直接击中,建筑物内的感应电动机、备用发电机、中央空调、电梯等产生的内部浪涌,电力故障所产生的各种外部浪涌,因为静电感应、电磁感应、电位反击等所造成的各种感应雷电等。因此必须要加装浪涌保护器以保护电源线和数据线。

② 机房接地不可等同于设备的浪涌防护。机房接地是计算机设备和精密电子设备正常工作的需要。机房接地主要是可以防止静电(如静电荷出现积累,可以从地线泄放掉),这样可以保护机器和人员的安全;另外有些设备接地后才可以正常的工作(不接地会受到电磁干扰、以及无

基准点)。所以机房接地并不是用来做雷电防护之用的,也是防护不了的,必须要加装浪涌保护器才可以防止雷电和内部、外部浪涌起防护作用。

③ 采用 UPS 供电的设备仍需要做浪涌防护。UPS 的作用是对供电系统突然停电或电压不足提供支持,在突然断电时,UPS 保护电气和电子系统、处理控制器和数据免受部分或全部的损坏。有些 UPS 带有低能的浪涌抑制器。这种内置的低能抑制器只能用来保护和 UPS 相连的负载免受能量有限的弱浪涌的袭击,因此,不能作为专门的解决浪涌问题的方案。更重要的是:有研究表明 UPS 设备中的敏感电气控制线路极易受到浪涌的破坏。而这些线路经常是监视 UPS 的工作状态以及 UPS 的交流电源的输入、输出状态的。

1884 年成立的电气与电子工程师协会(IEEE),是世界最大的技术专业团体,曾十分关注 UPS 可能受到的破坏,并在 IEEE 标准 1000—1992 中专门编写了一章 9.10.3: UPS 浪涌防护。其中指出:雷电和其他产生瞬态电压的现象,对大部分 UPS 设备和敏感的电气负载设备是有害的。因此,建议 UPS 的整流器输入系统和辅助的 UPS 旁路系统(包括人工保养的旁路系统)都应加装 IEEE.41—1991 标准中规定的有效浪涌防护装置。

④ 浪涌保护分级。我国在机房建设的浪涌防护方面有明确的要求,要求所有机房必须要做直击雷电防护和接地网的建设;要求有条件的机房和比较重要的机房必须进行感应雷电的防护。对于最新的计算机机房和通信机房的建设规范中都明确要求要进行感应雷电的防护;《气象法》中明确要求政府机关和有条件的单位在建设机房时要考虑雷电浪涌防护问题;在最新的建筑电气设计规范中,明确要求要进行感应雷电的防护;在许多行业的机房建设规范中都有明确的要求(如银行、金融、电信、税务、政府机关、法院、公共市政设施等),必须进行机房的浪涌防护。

所有敏感电气设备的运行都是在严格的电压范围内进行的,超过 1kV 的高速过电压对电气设备都非常危险。任何雷电保护措施的目的,都是要把过电压限制在 1kV 以下。浪涌保护一般分三级,其目的是把过电压钳制到安全的范围内。

### (3) 浪涌防护器的选择

应选择一个技术先进的制造商,产品应具有详细的说明书、技术指标、产地、符合各方面的标准证书及拥有销售许可证书等。

① 设计是否有利于用户并且容易安装。理想的产品应该是一个小型、紧凑并且能够安装在现有的空间内,同时易于安装。浪涌防护器本身的体积尺寸越大,它固有的内部线路电感就越大;防护器本身体积小,电感也小,防护效果就更好;小体积防护器的另一个优势是可以安装在靠近配电箱处,因为连线本身也有电感,连线长,对防护系统的不良影响也就越大,因此在安装浪涌防护器时越靠近配电箱越好,最好是在 15cm 以内。在电气设备狭小的空间内不可能安装大体积的防护器。

② 反应时间。浪涌防护器的反应时间必须比浪涌的速度快。反应时间在纳秒级均符合技术要求。

③ 一次能够处理的最大电流。最大电流即峰流是表征一个浪涌防护器处理最大电流能力的指标。Bellcore 实验室(AT&T-Bell 实验室的研究机构)为了保护它的高度计算机化的实验中心,进行了广泛的调研,明确了浪涌防护器处理最大电流的能力和所需的技术参数,一个 20kA 的浪涌防护器即可满足要求。由此可见,在任何建筑物内的分支线供电箱处安装一个 80kA 的浪涌防护器,便足以解决任何可能出现的浪涌问题。对多雷击区的贵重电气设备,应在建筑物入口的交流配电箱处安装一个较大的浪涌防护器,峰值电流从 65kA 到 160kA。

④ 吸收能量的能力。浪涌防护器吸收能量的能力以焦耳来衡量，焦耳值越高，浪涌防护器的使用寿命越长。

⑤ 钳制电压的能力。也就是将过电压钳制到电气设备所能承受的安全范围之内能力。计算机被设计在一定电压范围内使用，如果超出了这个范围就会导致计算机的损坏。因此，浪涌防护器必须把过电压钳制到安全水平。1998 年 6 月 1 开始实施的 GA173-1998 标准规定：用于 220/380V 电力系统的计算机防雷保安器（浪涌防护器）的钳制电压应小于或等于 2kV。

⑥ 符合国际和国家标准。国际标准包括 UL449、IEEE、NEMA 和 IEC。在我国同样有相应的标准，公安部公共信息网络安全监察局要求：所有用于保护计算机的防雷保安器（浪涌防护器），都必须根据 GA173—1998 的标准通过检测并获得销售许可证后，方可销售。

⑦ 产品的可靠性及制造商的客户单。了解制造商的客户单以及厂家从事产品生产的历史有助于了解厂家的信誉和其产品的可靠性。

⑧ 质量保证。保质期限的长短体现了制造商对其产品是否不出问题、并长久地保护设备的自信心。一旦产品出现问题，客户是否能得到快速免费的服务，也是用户必须考虑的因素之一。

#### （4）浪涌防护器设置

最大的浪涌产生在建筑物外，由雷电和电力公司切换负载所致，这种感应浪涌可沿电力线传输，进入建筑物内。电源系统浪涌防护器的具体配置应根据供电系统接地型式选择。220/380V 供电系统接地型式常采用的有 TN-S、IN-C-S、TT、IT 四种。

交流电源与计算机的电源相连，数据线把计算机与电话线或局域网连接在一起；给计算机提供电源的交流电源线路、将计算机与电话通信网、数据网或其他局域网连接在一起的数据线路，浪涌可以通过这些线路破坏性地干扰计算机。因此，与计算机相连的电源和数据线都需要安装浪涌防护器。

#### 3. 抗持续干扰的电源装置

电源中的持续性干扰往往使控制装置丧失工作能力，对设备或产品造成重大损失。所以，生产过程实时控制系统应有备用电源装置，而其他不很重要的场合，只要求停电时能保存计算机内部必要的信息即可。

备用电源既可设置在交流电源进线处，即一次侧，也可设置在整流电源等二次电源处。根据设备的重要性和需克服的持续干扰时间的长短，可分别采用以下几种方法：

（1）用二次电源来抑制电网中因切换负载而产生的几毫秒至几十毫秒的欠电压持续干扰。二次电源如果是连续调节式整流电源，依靠整流装置中滤波电容器储存的能量，能使二次输出直流电压在 10ms 左右时间内不低于允许的最低电压（4.75V），足以保证现场数据退避到有电池供电的存储器；二次电源如果是脉冲调节式电源，因其能维持二次电源输出直流电压 100~200ms，抑制上述欠电压持续干扰有充分保证。这种方法对简单的控制设备很适用。

（2）用旋转变流机组供电可以解决因负载短路或电网切换引起的 1~2s 的长时间持续干扰问题。旋转变流机组包括异步电动机和同步发电机，有时为延长作用时间还配有飞轮。一般变流机组在切断电源后依靠其转动部分的动能可以维持供电时间达几十秒之久。同时由于机组的偏离作用，还能有效地抑制电网中的脉冲噪声。旋转变流机组供电的固有缺点是机械噪声大，需要定期维护；另外，它体积大、笨重，而且对功率较小的计算机系统供电时其效率较低；所以这种方法适用于不太重要的场合使用。

（3）对于电网故障造成的停电时间超过 30min 的持续干扰问题，应采用不间断供电系统。

最简单的办法是用蓄电池作浮充电连接,如图 10-4 (a) 所示。当交流电源正常时,蓄电池经充电电阻  $R_1$  浮充电;当交流电源电压低于允许值时,蓄电池经二极管 VD 继续向计算机稳压电源供电。由于蓄电池的内阻相当低,所以采用蓄电池浮充电的备用电源还可以显著改善整个装置的电源传导敏感度。图 10-4 (b) 是一组实测数据。

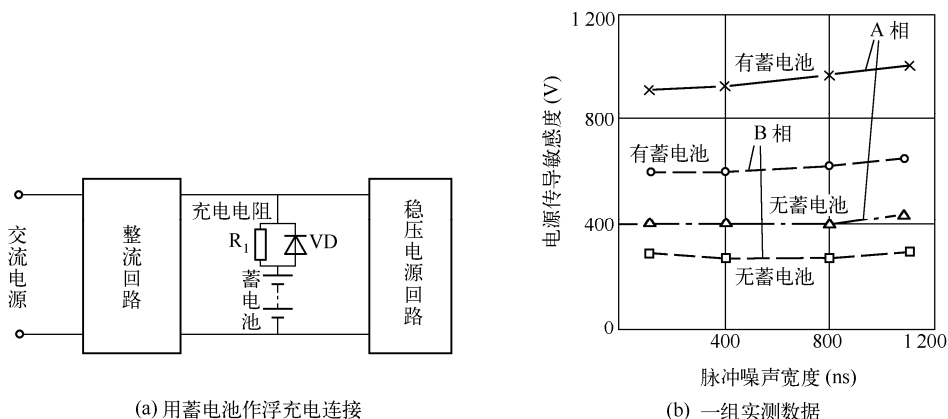


图 10-4 以浮充电方式工作的不间断供电系统

于交流电源侧对整个计算机系统设置不间断供电电源 UPS,一般用于较重要的生产场合,目前以下面两种为主:

① 旋转式备用电源。由应急柴油机和交流发电机组组成。当检测装置检测到 380V 电网故障时,立即起动应急柴油发电机组,向计算机系统供电。这种方式有一定优点,如价格较便宜,但也有不足之处,如机械噪声较大,对发电机组的快速性要求较高,另外,为确保应急时能立即投入使用,必须定期进行检查。

② 静止式不间断供电电源。由蓄电池和直流-交流逆变器组成。蓄电池组正常时由电网电压充电。当电网停电时,静止式不间断供电电源在很短时间内启动,投入供电。现阶段的一次侧静止式不间断供电系统价格较高、体积偏大。但具有启动快、可靠性高、机械噪声小、无振荡、效率高等一系列优点,并因无旋转磨损部分而维护方便,使用寿命长,目前正广泛使用。

#### 10.1.4.4 计算机电路的抗干扰措施

##### 1. 增加总线的抗干扰能力

##### (1) 采用三态门方式总线提高抗干扰能力

TTL 集成电路采用图腾柱输出方式,它有以下优点:输出阻抗低,传输速度快,负载能力强。缺点:推拉式结构限制电路的“线与”功能。

集电极开路(OC)门具有线与功能,可挂总线使用,但对驱动的总线在杂散电容、电感和电气干扰等因素中都有严重影响,它们的输出不能满足总线结构数据传输的设计与应用中的要求。

采用三态门可提高总线的抗干扰能力,三态门在总线上联结可达 400 个,三态门的总线抗干扰能力比 OC 门约大十倍左右;三态门可驱动 100m 的长线,OC 门只能驱动 3~5m 长线。

##### (2) 总线加吊高电阻提高抗干扰能力

8080 计算机系统的地址总线所加吊高电阻如图 10-5 所示,采用这一措施可增强总线的抗干扰能力。

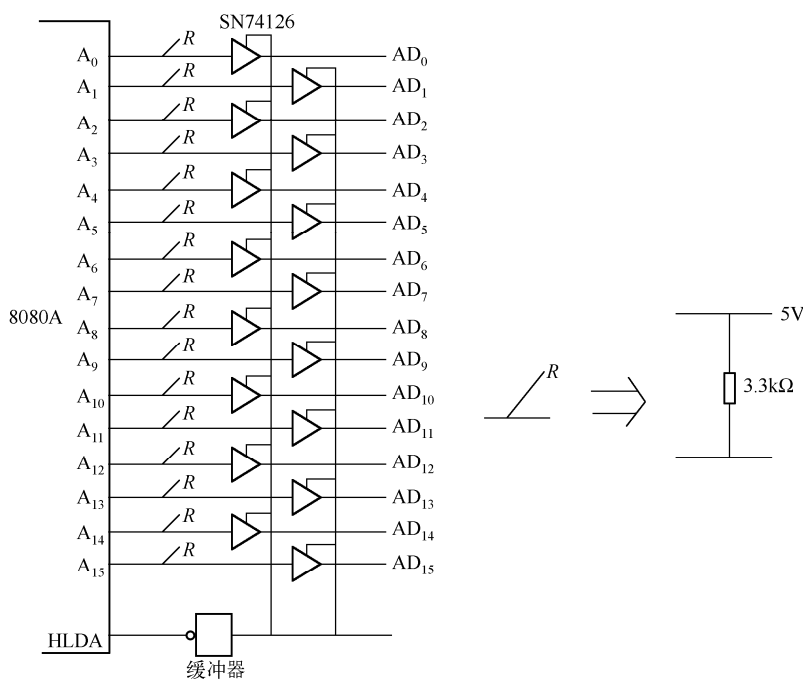


图 10-5 8080 总线加吊高电阻

### (3) 总线的接收加缓冲器以减少噪声影响

总线的接收，特别从一块印制板到另一印制板较长距离传送后接收时，最好加一施密特电路来作缓冲器，可大大减小噪声影响。

### (4) 防止总线上数据冲突的措施

某瞬间在总线上同时加入两个不同数据，由于高低电平正好相反，使某驱动电路产生瞬时短路现象，可解决数据的冲突问题。

## 2. 系统防辐射措施

数字电路特别是计算机和微处理机中电路时钟频率很高，其波形所包含高次谐波频率就更高了，例如高速型电路 74AS04，脉冲占空比为 50% 时，由频谱分析仪测出其高次谐波频率可达数百兆赫兹，这种高频成分会产生强烈辐射，干扰其他电子线路。特别是当印制电路板的印制线、电源线、及 I/O 接口电缆等产生驻波时，在此频带附近，这些导体会成为效率很高的发射天线，产生强烈辐射，为防止和减弱辐射的影响，可采取以下措施：

### (1) 改善电源线、地线的抗干扰性能

据测定，微型机电路中冲击电流较大，随着电流突变，电源线会产生强烈辐射。可采取以下措施：

- 降低电源线的对地阻抗。
- 在冲击电流较大器件电源端与接地端上并接旁路电容，使冲击电流限制在很小的环路上。
- 地线阻抗尽可能地小，使系统有性能良好的地线。

### (2) 信号线加阻尼

由于时钟电路易产生高频辐射，故应首先考虑这种电路线上加铁氧体磁珠。在地址线上穿磁珠会有效抑制振荡和辐射。

信号线上加噪声滤波器。

### (3) 注意印制电路的设计

设计印制电路时,高速信号线要尽可能地短,信号返回所形成环路面积要小,主要信号线最好集中板中心,时钟发生电路在这中心附近。

对于高速电路多余门避免较远线路所利用,宁可空闲不用。

为减小线间耦合,可加大印制线间距离,避免长距离平行走线,或在线间加接地印制线作屏蔽隔离。

### (4) 屏蔽辐射源

屏蔽辐射源最好用高导磁率的材料。塑料喷涂金属粉末工艺屏蔽效果也很好,这种屏蔽要注意零件结合部要有连续可靠的电气接触,可用海绵状细金属丝编织带作填充物;若屏蔽效果不明显,应检查是否因电源线和信号电缆形成辐射。可采取以下措施:

电源线加电源滤波器,信号电缆采取屏蔽措施,传输低频信号时,在装置内部耦合了高频信号而产生辐射,可使用共模扼流圈,它采用铁氧体环形磁芯,只要让信号线成束地通过(0.5 匝)即可(其中包括地线)。当在磁芯上绕 1.5 匝时,效果可增加三倍,多绕效果不明显。

屏蔽电缆和插头座之间连接应注意屏蔽体的连续性,外加铁氧体磁芯插头效果比较好。

### (5) 电源去耦,减小辐射能量

在集成电路电源端与地线之间接一陶瓷电容,就可有效抑制环路向外辐射。

### 3. 抑制存储器部分产生的噪声

在计算机电路中存储器部分往往是一个噪声发生源。存储器电路数量较多且集中在一起,不但平时的功耗电流大,且因线路的阻抗导致电源纹波增加。更重要的是在存储器电路刚选中进行读或写的瞬间,会产生很大的冲击电流。这个冲击电流将在印制线路的阻抗(主要是电感成分)上产生一个幅度较高的噪声电压,成为一个严重的噪声源。

#### (1) 动态 RAM 抗干扰措施

加旁路电容。电源线和地线的印制电路板布线要尽可能短。

#### (2) 静态 RAM 抗干扰措施

在设计安排 RAM 电路时,要尽可能使流过印制板各处的电流都比较均匀,不让电流变动大的区域在印制电路板各处频繁移动。这样可使存储器存取瞬间所产生的噪声电压峰值变小。

## 10.1.4.5 计算机系统装接技术

在过程控制计算机系统中,计算机与外围设备、计算机与过程输入/输出设备等的连接,在设计抗电磁干扰方面起着至关重要的作用。

### 1. 系统连接

系统连接是指插件、底板、机柜之间的信号连接。进行系统连接设计时,除注意传输线的特性阻抗、传输损耗和频率特性等参数外,还要考虑信号的串扰和传输线阻抗不匹配引起的反射等问题。正确选用不同种类的传输线,如双绞线、同轴电缆、扁平电缆等也极为重要。

#### (1) 线间串扰

计算机系统中,错综复杂的信号线之间必然存在电容耦合和电感耦合,所以相邻信号线上必将产生线间串扰。因此,在机架底板上走线时,除尽量减少平行走线的距离和平行走线的根数外,还应力求底板走线密度均匀。长距离的信号传输线的走线要力求松散,不要捆扎在一起。如果底板走线中有大功率电路,则大功率传输线以用低阻抗电缆为宜,并将其架空,高于其他走线 4~5cm 为好。

## (2) 插针干扰

高速信号通过接插件的插针时, 相邻插针之间的串扰也是很大的, 其幅值与电流(电压)变化率成正比, 并与端接电阻、插针间的距离相对地的距离有关。为抑制插针干扰, 除合理设计接插件, 使每根插针外面有屏蔽保护之外, 对已定型的插头座, 应该注意插针上的信号布局, 可从三个方面考虑:

① 增加接地针。用一部分插针作接地针, 均匀分布在各信号针之间, 起隔离作用, 以减少插针间电场互相干扰。最好每一信号针两侧都是接地针, 所以信号针和接地针的最理想比例为 1:1。

② 分散配置信号针。如果一个插头座上信号针较少, 则采用分散配置, 以增大彼此间隔。

③ 利用信号翻转时间差。一个插件上的多个信号若不是同时变化, 它们产生的干扰信号便不会叠加, 从而使干扰信号的幅值有所降低。所以设计时利用信号翻转时间差也能降低插针干扰的影响。

## (3) 集成电路输入端之间的串扰

由于存在结电容和分布电容的耦合, 当门电路的一个输入端为高电平, 而其余输入端同时同相翻转时, 该门电路的反相输出端往往会出现一个同相干扰脉冲, 称此为输入端之间的干扰。对于多输入端的集成门电路来说, 应该遵守同时同相翻转的输入端的个数不要超过三个的原则。

## (4) 接线

电源线与信号线必须使用屏蔽电缆, 并在电源入口处接入交流电源线路滤波器。引入机柜的电源线和信号线屏蔽电缆的屏蔽层应该与地有较大的接触面积。

在大型系统中, 单相输入时用三芯电缆, 三相输入时用四芯电缆, 其中一芯用做安全接地。动力输入线必须屏蔽, 屏蔽层接在机壳上, 以避免动力线中的高频噪声感应到系统的信号线; 机壳接地线的粗细必须与动力线的截面相适应。

装置输入端安装的线路滤波器外壳也必须接地, 使外来线路的噪声通过机壳馈送回大地, 装置内部产生的噪声也通过机壳入地。

## 2. 总体安排原则

在计算机系统总体安排上要遵循以下原则:

(1) 计算机和外围设备按各自体系要有明显界限, 不能混装, 即使小系统只有一块印制电路板也要有明显组群集合。

(2) 大功率电路和器件应与小信号电路分开。

(3) 噪声敏感器件应缩短连接的信号线。

(4) 发热量大的器件如 ROM、RAM 等应尽量安排在较小影响关键电路和通风冷却较好的地方; 印制电路板垂直放置时发热量大的器件应安置在最上面。

## 3. 印制电路板布置及连接线注意事项

### (1) 强电线路安装及布线

市电网进入系统稳压电源, 部分连线为强电线路, 会对其他线路形成干扰。安装和布线时应注意以下问题:

① 稳压电源应就近安装在交流电源进入系统的地方, 连线采用双绞线并尽量缩短。

② 如接有电源滤波器, 从滤波器到电源变压器的连线要短, 且使用屏蔽线。

### (2) 弱电线布线

稳压后电源供电线应尽量短, 往返两根线使用双绞线, 绞距应小于 3cm。

当直流稳压电源需较长距离供电时, 应使用铜板结构的汇流条作为供电线路和零线。

系统各部分信号传输线应采用双绞线或屏蔽线, 并采用数字电路抗干扰措施。

#### 10.1.4.6 磁盘装置防干扰技术

计算机系统的外存储器之一是磁盘存储器, 这是以旋转的磁盘或磁盘组为记录媒体的数字磁记录装置, 它由磁盘、磁头、机械伺服装置、读写电路和控制回路等组成。通常多用直径为 350mm 的圆铝板, 涂以磁粉作存储媒体, 磁头从存储媒体读出的信号电平约 1mV, 信号频率在 10MHz 左右。

就整个磁盘装置来说, 既有产生噪声的部位, 也有易受噪声影响的部位。主要的噪声源有下面几项:

(1) 交流电源回路导线(或电缆)、开关器件、继电器、驱动磁盘旋转的电动机等产生的噪声。

(2) 叠加在交流线路中的外来噪声。

(3) 驱动磁头移动的音圈电动机的加速、减速电流(10A 左右)开关噪声。

(4) 因直流电源不稳定而产生的电源噪声。

(5) 读写电路所用的中、高速逻辑元件(前、后沿时间为 2~3ns)产生的噪声。

(6) 积蓄在绝缘部位的电荷放电噪声。

(7) 音圈电机中的永久磁铁的泄漏强磁场等。

易受噪声影响的部位主要有下述几部分:

(1) 驱动音圈电机的反馈回路。

(2) 检测速度用的转速表。

(3) 装置内部长距离传输模拟和逻辑信号的传输线路。

(4) 装置之间接口信号的传输线路。

(5) 电源线和接地线。

(6) 磁头至读出前置放大器之间的引线等。

为抑制磁盘装置内的静电耦合噪声和电磁耦合噪声, 除采用前面讲过的常规措施外, 还要对磁盘装置特有的干扰现象通过采用屏蔽线或双绞线, 或利用外壳屏蔽作用及实现低阻抗化等措施予以解决, 下面讲几种具体办法。

##### (1) 选用适宜的屏蔽线或双绞线

磁头到前置放大器之间的磁头引线所传输的信号电平最低, 磁头在寻找目标磁道位置时的移动距离为 40~60mm, 数据磁头的引线长为 120mm, 而伺服磁头的引线长为 200mm。由于受结构的限制, 音圈电动机的线圈与磁头的距离不能超过 100mm, 线圈中的强脉冲电流对这些引线有很强的感应。为清除这些引线上的耦合噪声, 使用屏蔽线虽然有效, 但是寻找目标磁道位置的动作要求该导线的弯曲次数应在  $10^8 \sim 10^9$  次, 故用普通结构的屏蔽线不行, 必须使用极细的绞线, 同时要对线圈弹簧加屏蔽, 连接直流地。由于伺服磁头的引线更长一些, 为加大屏蔽效果, 可把磁头引线线圈弹簧的中间部位直接接到直流地。

为缩短磁头引线长度, 现在已把读/写前置放大器、磁头选择开关电路和保护电路做成集成电路装在磁头臂上, 这样可以加强信号电平, 改善读/写信号的高频传输特性。

使磁头定位的反馈回路往往受功率驱动器产生的非线性高频噪声的影响而出现振荡。最好用屏蔽线来传输功率驱动器所反馈的电流反馈信号。此外音圈电机到逻辑电路部分的距离长约 3m,



为减少外来噪声的影响,也应使用屏蔽线。

对于大型磁盘装置,磁头读出的信号经前置放大器放大 50~100 倍左右后,以差动方式传送到 2~3m 远处的逻辑门,为使信号与外面的电场隔离,最好用特性阻抗为 100Ω 左右的同轴电缆或屏蔽线;控制器到磁盘装置的距离有时可达 10~15m,大多使用近似于 TTL 电平的发射极跟随器作收发器,为保证控制信号的可靠传输,宜采用特性阻抗为 120Ω 的扁形导线。

### (2) 合理利用机柜的屏蔽作用

众所周知,机柜自身的表面具有较大电容,可以吸收噪声。所以大型磁盘装置中,可以把相邻的机柜用编织线连接起来,中、小型磁盘装置的机柜较小,可将其与系统中的大机柜连接。此外,磁盘装置的机柜也可用金属板覆盖,其内部易受噪声影响的部位(如磁头的前置放大器等)用静电屏蔽效果好的金属板覆盖为宜。

### (3) 降低线路阻抗

主要是尽量降低印制电路板电源印制线条和信号线的阻抗。除采用尽量粗而短的印制线条外,必要时可考虑采用三层或多层的印制电路板。

### (4) 抑制磁盘装置内部产生的静态和动态强磁场

在使用音圈电机驱动磁头做直线快速移动的磁盘装置中,音圈电机是个噪声源。因为音圈电机中有永久磁铁和移动的线圈,当巨大的加减速电流加到音圈上时,磁铁中心极四周产生交流强磁场;该磁场能破坏磁盘上记录的数据,因而应对音圈电机施加磁屏蔽,可用铁板将其遮盖。另外,在音圈电机内部还有测速线圈,用来检测磁头寻找目标磁道位置时的移动速度;此测速线圈也需装在铁盒中以摆脱外部强磁场的影响。还有,为削弱磁铁中心极所产生强磁场的共模噪声影响,还可以把绕制方向不同的两个线圈采取级联接线方式。

### (5) 磁盘装置内的一点接地

安装磁盘、磁头、音圈电机等的铸铝底座总重量大多在 15kg 以上,有的可重达 150kg 左右,该底座可提供稳定的电位,作为直流地。为提高计算机系统整体的噪声容限,必须注意分开直流地和交流地。这里介绍磁盘装置内部的一点接地——心轴接地方法。通常,磁盘以转速为 7 200r/min 的高速旋转时,磁盘的心轴虽然经轴承与底座相连,但与轴承间有油膜,电阻很大,高速旋转时与空气摩擦产生的电荷便积蓄在磁盘上,使磁盘的电位升高,此电位差导致磁头和磁盘表面放电,从而发生读取故障。为了消除磁头和磁盘表面的电位差,应如图 10-6 所示,把安装磁盘的心轴与基座相连,使心轴接地。

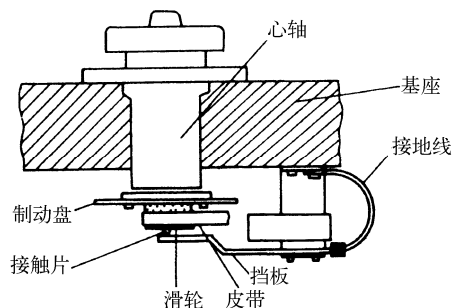


图 10-6 心轴接地

除上述抗干扰措施外,磁盘装置还应采用下面几种办法来减少误动作:

① 对磁盘装置中记录再生线路的信号,应该采用差动放大器进行处理,以抑制侵入电路的共模干扰。

② 磁盘装置的交流顺序控制电路所采用的集成电路,如果使用普通的 TTL/DTL 器件,往往因逻辑幅值小而不能保证噪声容限;最好采用信号范围为 12V 的高阈值逻辑集成电路。

③ 充分利用计算机系统的检错、纠错等软件。

上述种种硬件措施虽然能抑制大部分干扰,但终究不能完全排除所有错误。当出现读取错误时,应该用检错编码将错误信息检测出来,然后用错误校正码修改错误,或者通过“多次读入”

和“再执行”等软件纠正错误。

#### 10.1.4.7 软件防干扰的措施

把计算机的硬件和软件结合起来处理电磁干扰问题是电子计算机系统的优越性之一。用程序设计手段来排除进入计算机系统的电磁干扰可以简称为软件抗干扰措施,其实质是充分发挥计算机的存储功能和高速运算功能,使该系统能够识别错误操作、错误状态和错误信息,进而命令计算机对它们不响应,或者躲开干扰信号出现的时间,使计算机始终保持在正常情况下有效地工作。

为把错误信息和隐患在对系统形成危害之前检查出来,现阶段的各种计算机系统已普遍采用检错纠错技术,或者具有自诊断功能。前者是在信息存储、变换、加工和传送过程中采用一些特定的编码来对信息进行校验,以发现错误,如奇偶校验码、汉明码、冗余码、循环码等;后者是在程序中预先设置多个校验点,当程序通过该校验点时,将运行状态与预先存入的状态进行比较,如果出现异常,立即通过备用程序进行处理或报警。

通常,错误信息输入 CPU 的原因很多,除噪声侵入 CPU 输入端子外、外部输入设备的缺陷,如接触不良、绝缘不良、计算机硬设备的某部分出现故障,以及输入线异常、短路、感应,甚至螺钉松动等都能导致误输入。为了能够迅速找出数字输入的偶发性随机故障和模拟量输入误差产生的原因和发生部位,应按一定的检查流程图来编制相应的软件查寻故障,并根据查出的故障原因采取相应的处理措施。

##### 1. 开机自检

开机后首先对单片机系统的硬件及软件状态进行检测,一旦发现不正常,就进行相应的处理。以单片机系统为例,开机自检程序通常包括对 RAM、ROM、I/O 口状态等的检测。

##### (1) 检测 RAM

检查 RAM 读/写是否正常,实际操作是向 RAM 单元写“00H”,读出也应为“00H”,再向其写“FFH”,读出也应为“FFH”。如果 RAM 单元读/写出错,应给出 RAM 出错提示(声光或其他形式),等待处理。

##### (2) 检查 ROM 单元的内容

对 ROM 单元的检测主要是检查 ROM 单元的内容的校验和。所谓 ROM 的校验和是将 ROM 的内容逐一相加后得到一个数值,该值便称校验和。ROM 单元存储的是程序、常数和表格。一旦程序编写完成,ROM 中的内容就确定了,其校验和也就是唯一的。若 ROM 校验和出错,应给出 ROM 出错提示(声光或其他形式),等待处理。

##### (3) 检查 I/O 口状态

首先确定系统的 I/O 口在待机状态应处的状态,然后检测单片机的 I/O 口在待机状态下的状态是否正常(如是否有短路或开路现象等)。若不正常,应给出出错提示(声光或其他形式),等待处理。

##### (4) 其他接口电路的检测

除了对上述单片机内部资源进行检测外,对系统中的其他接口电路,比如扩展的 E<sup>2</sup>PROM、A/D 转换电路等,又如数字测温仪中的 555 单稳测温电路,均应通过软件进行检测,确定是否有故障。

只有各项检查均正常,程序方能继续执行,否则应提示出错。

##### 2. 数字滤波

计算机系统正常工作时,外界的干扰信号总是或多或少地进入计算机控制系统中。为减少干

扰,提高系统的可靠性,常采用数字滤波技术,如程序判断滤波、中值滤波、算术平均滤波、加权平均滤波、滑动平均滤波、RC 低通滤波、复合数字滤波等。

### 3. 设立软件陷阱

计算机控制系统的程序是一步一步进行操作的。所谓程序失控,是指计算机偏离预定的执行过程,使程序无法完成原设定任务,严重时会使整个系统造成瘫痪。造成程序失控的原因并非程序本身的设定问题,而是由于外部的干扰或机器内部硬件瞬间故障所造成的。

仍以单片机系统为例。在程序存储器中总会有一些区域未使用,如果因干扰导致单片机的指令计数器 PC 值被错置,程序跳到这些未用的程序存储空间,系统就会出错。软件陷阱是在程序存储器的未使用的区域中,加上若干条空操作和无条件跳转指令,无条件跳转指令指向程序“跑飞”处理子程序的入口地址。如果程序跳到这些未用区域,就会执行无条件跳转指令,转到相应的程序出错“跑飞”处理程序。除程序未用区域外,还可以在程序段之间(如子程序之间或一段处理程序完成后)及一页的末尾处插入软件陷阱,效果会更好。下面是一段带软件陷阱的程序。

```
DSP:.....;显示子程序
RET
NOP;软件陷阱
NOP
NOP
LIMP FLY
D10MS:MOV R0,#010H;延时子程序
.....
RET
NOP;软件陷阱
NOP
NOP
LJMP FLY
.....
FLY:.....;“跑飞”处理子程序
RET
```

### 4. 软件冗余技术

软件冗余技术在计算机系统中主要体现在给数据增加一定的冗余位,加大数据字符的汉明间距。例如,原信息(数据)增加一个校验位,汉明间距变为 2,能有 1 位的检错能力。奇偶校验码、汉明码等都属于软件冗余技术。在快速成组数据传输系统中常使用的误码检测方式是循环冗余校验法(Cyclic Redundancy Check),也属于软件冗余,这种冗余是在每个字组信息码后面附加几位至十几位冗余位,使整个字组序列完全符合规定规律后才送到下一级去。下面分别对此作一简介。

#### (1) 奇偶校验

设置奇偶校验位是比较简单的方法。因为在正常情况下,出错的概率比较小,不出错的概率很大;而出错后错一位的概率最大,错两位的概率很小。设置奇偶位可以检出一位错码,即检出错概率最大的情况。

偶校验可以查出数据有一位出错,但不能判断出错的具体位置和自动排除。由于只需增加一位校验位,线路简单,被广泛应用于计算机的内、外存储器(磁带、磁盘、磁鼓)和输入/输出设备(光电机、宽行打印机)等的信息差错检测。

### (2) 水平、垂直奇偶校验

又称为方阵码校验。国际上常用的数据通信代码为 ASCII 码、ISO7 单位码等, 这些全是 7 单位码, 使用时按 8 单位代码传输, 大多将第 8 位作为校验位使用, 在同步传输时用作偶校验位; 异步传输时用作奇校验位; 个别情况下第 8 位恒为 1。水平校验为组校验字符, 由码组中每个字符的相同位以 2 为模相加而产生的, 附在数据组末尾, 与数据组一起传送。奇偶校验的误码率随字长和组长的增加而迅速增加, 因此必须增加检错反馈重发设备, 即用牺牲通信速率的方法满足误码率的要求。

奇偶校验适用于中、低速通信。当数据组长小于 128 字, 传输速率为 1 200b/s 时, 误码率为  $10^{-8}$ 。水平、垂直奇偶校验能有效地检验差错, 但只能检错而不能纠错, 只在反馈重发条件下才能纠错, 所以这种方法用得不太广泛。

### (3) 汉明码

汉明校验可以同时测出一组信息中的两重错, 能够定位和自动纠正一重错。这是一种最小码距为 3 的信号编码方法, 称为汉明码 (SEC)。从 1950 年问世后至今已被广泛应用在各种大、中、小型计算机中。随着集成电路的发展, 已生产出汉明码编码-译码芯片, 为实现汉明校验提供极大方便。

校验过程是通过汉明校验电路来实现的, 分为编码和译码两个阶段。在编码阶段把原信息码和汉明校验码组合成汉明码, 送往信号通道; 在接收端, 经过汉明校验系统译码对传输来的汉明码进行检错和纠错, 然后得出应该传送的原始信号。

### (4) 循环冗余校验 (CRC)

二进制字组可用代数多项式表示, 循环冗余校验是在发送端把待传送的二进制字组用一特定的生成多项式去除, 把余数附加在数据字组的后面作为冗余位, 构成一个新的数据字组。在接收端把所收到的字组进行除法运算, 若无差错, 此字组能被除尽; 若不能除尽, 则是出现了差错。

CRC 检错能力取决于生成多项式的幂次, 就是说, 取决于 CRC 码的长度和生成多项式的种类, 国际电报电话咨询委员会 (CCITT) 推荐使用 16 次多项式, 可检出长度在 16 位以内的数据字组差错。比这更长的差错大多为成串差错, CRC 检测方式对于成串差错有非常好的效果, 即使发送上万位信息, 只需附加几位到几十位冗余码即能检出差错。

CRC 目前已成为 2 400b/s 以上的高速数据差错控制的标准方式。冗余位为 12 位时, 能检出所有一位错、二位错、奇数个位的差错, 以及 13 位的突然性差错。美国通用电气公司的 TDC-4500 (过程控制用) 的系统字长 24 位, MOS 存储器存取周期为 600ns, 存储器和 CPU 之间的数据传输加入 6 位冗余校验位, 能检出和纠正全部一位错, 检出所有二位错和 90% 以上的三位错。

### (5) 指令复执

在具有上述几种冗余度功能的系统中, 如果发生误动作, 便能立刻检测出错误。如果没有自动纠错功能, 可通过错误中断功能告知系统软件, 系统软件得知发生错误后, 立即对发生错误的那些处理过程重新运行一次, 如果错误是瞬时干扰造成的, 可以通过再次运行得到纠正。这种再运行称为指令复执。

指令复执是当发现故障后立即停止执行当前的指令, 保存断点, 并让该指令重新执行若干次或若干时间, 若不再出错, 则是暂时性故障 (或干扰), 便可继续运行原来的程序。如果在指令复执一定次数或规定时间后仍然出错, 则说明有固定性故障, 应该进行相应级别的中断和必要的处理。

一般情况下, 复执是通过“复执”指令实现的, 也可通过操作系统或人工操作来实现。为使

于进行指令复执，或者某一段程序的复执，应该在编制程序时考虑到程序分段，每段设置一个基准校验点。因为瞬态干扰所引起的暂时性故障往往持续一定的时间，如果在一条指令复执的时间范围内还消除不了外来干扰时，可以采用程序的复执，即用程序返回重试，也称为初始化预置。当程序重试时，只需返回出错的那一段程序复执，不必返回到程序起点。利用触发器和存储器进行初始化预置，通过软件实现系统对某项处理之前应具备的状态。如果系统的某一部分受到噪声或其他不明原因的影响，没得到该项处理应具备的状态，便能通过初始化预置摆脱错误，从而保证下一步处理的正确执行，就是说，初始化预置可以提高系统对干扰影响的自动复原能力。

在计算机系统正常使用期间，由于暂时性故障占第一位，而且它是随机性的，持续时间很短，时隐时现。如果采用指令复执和程序卷回，便能自动地恢复正常工作，避开各种随机性干扰。因此，被认为是比较典型的软件抗干扰措施，应用相当广泛。

#### 5. 时间监视器

为防止程序陷入死循环，常采用一种时间监视器（WDT，Watch Dog Timer），用来监视程序的正常进行。Watchdog 由两个计数器组成，计数器靠系统时钟进行计数。这是一种硬件计数器，是在程序正常运行过程中，由程序不断地复位、再预置数，并重新计数。WDT 的预置数在固定频率的计数脉冲作用下递减，所以计数便代表计时。当计数值减到零时发出信号，表示“到时”。其预置数的选择要符合以下要求，即计数值减到零所需要的时间间隔必须大于程序正常运行时使其复位的时间间隔。因此，当程序正常运行时，WDT 在计数值被减到零以前就被复位，计数值总不会减到零。如果计算机的硬件或软件运行异常，使计算机迟迟不能给出复位信号，WDT 的计数值就会递减到零，于是 WDT 发出信号，表示系统运行“超时”，说明有故障或者受干扰，应该做相应的处理，如系统初始化、再次自起动或者系统本身发生中断等。当计算机系统出现严重故障，如电源故障、程序进入死循环、处理机停机或挂起时，WDT 便发出报警信号，作上述处理。如果是双机系统，则 WDT 起动开关自动进行切换，故障机离线，备用机转为值班机，系统降级继续运行，并不完全失效。也就是说，通过 WDT 的报警和相应的处理，便能及时检查出包括电磁干扰在内的各种故障，减少事故损失。

#### 6. 输入/输出数据的软件处理

由于输入/输出数据在传输过程中易受干扰，尤其是瞬态噪声的影响，通常可用下述软件手段予以消除。

##### （1）多次读入法

用这种方法处理开关量输入信号最适宜。数字输入单元直接连接着外部的输入设备，如继电器、开关器件等。为切断这类器件产生的干扰，除在硬件上采用光电耦合器、设置滤波电路等之外，还可用软件来消除干扰的影响。最普通的办法便是多次读入法，即 CPU 以一定间隔连续读入 2~3 次同样的输入信号才确认该输入为有效信号。这种读入指令复执和数据重发的主要方法是采用循环程序，使当前指令重复执行若干次，或根据工作的性质执行几十次，时间可达几百毫秒。脉冲干扰等引起的瞬时性故障经过一段时间即可自行消失，这样就避免了干扰输入。有资料介绍，指令复执和数据重发可排除 70%~80% 的瞬时故障。使用这种办法，可以不理睬数据传输过程中出现的瞬时错误，直到接收到正确数据后才继续执行下面的程序。

对于开关量的输入，为了确保信号正确，在软件上可采取多次读入的方法（至少读两次），认为无误后再行输入。开关量输出时，应将输出量回读（这要有硬件配合），以便进行比较，确认无误后再输出。

在计算机输出开关量控制闸门、料斗等执行机构动作时，为了防止这些执行机构由于外界

干扰而误动作, 比如已关的闸门、料斗可能中途打开, 已开的闸门、料斗可能中途突然关闭等, 对付这些误动作, 可以在应用程序中每隔一段时间发一次输出命令, 不断地关闸门或者开闸门。这样, 就可以较好地消除由于扰动而引起的误动作(开或关)。

### (2) 数字量数字鉴别法

对于数字量输入应鉴别其真伪, 方法是对接收数字量信号的输入接口按规定的时间间隔进行多次采样, 然后按位逻辑乘并进行比较, 比较结果一致时为真输入, 否则为伪输入。

### (3) 数字量输入的封锁法

封锁法对排除某些生产机械上产生的干扰既方便, 又经济可靠。在容易产生干扰信号的时间内, 或者于容易产生干扰的生产机械动作时, 封锁程序, 停止信号的采集; 当易产生干扰信号的时间已过, 或易产生干扰的生产机械动作完毕后, 再开始进行信号采集。

在计算机数据采集中也经常使用这种办法, 例如, 为避开键盘按键的抖动、输入接点的抖动等, 都可加入延时程序来避免信息输入出错。

### (4) 模拟量输入的数字滤波处理

一般来说, 微型计算机系统对数字量输入接口的噪声较易处理, 只要数字输入系统本身不产生误动作, 噪声干扰就基本没有危害作用。但是, 对模拟量输入的监控, 则是比较麻烦的事情。如果系统规模较大, 设计时很难考虑周全, 大多需要在使用现场配线后, 让微型计算机系统投入试运行, 在该运行初期判断信号中的干扰状况, 然后再研究和编制软件抗干扰等程序。另一种办法则是事先准备好一段噪声处理程序, 用改变某些设定数据来更改滤波器或抗扰系数等的数值。

模拟量的数字滤波需按照模拟信号的大小分别选用适宜的办法。对 0~5V (或 10V) 的大信号可采用下面三种数字滤波技术。

① 滤波系数法。用来滤除一些瞬间干扰值。

② 加权滤波法。这种方式速度较快, 实时性强, 适用于快速系统。

③ 中值与限幅双重滤波法。这种方法是把本采样周期内经  $n$  次采样排队取中值后的数值与前次采样经滤波后的数值相减, 再将差值与限幅值比较; 若差值小于限幅值, 则取本次的中值作为本次的采样滤波值, 否则便作为出错处理。限幅值应根据被控对象在正常运行时可能出现的最大值或最小值来确定。

通过上述几种数字滤波方法对数据值做出分析判断: 如果噪声是脉冲型的, 发生数据出错时可经过延时, 重新采样输入, 以避开噪声数据进入; 对于微小模拟量输入信号, 要求在微型计算机系统开始设计时就多方面考虑各种抗干扰措施。

### (5) 输出指令保护方法

当计算机输出一个控制命令时, 相应的执行机构便会工作, 往往伴随着火花、电弧等干扰信号, 这些干扰信号有时会通过公共线路返回到接口中, 改变状态寄存器的内容, 因而使系统产生误动作。再者, 当命令发出后, 主程序立即转移到检测返回信号的程序段。一般执行机构动作时间较长(从几十毫秒到几秒不等), 在这段时间内也会产生干扰。

为防止这种现象发生, 可以采用一种所谓软件保护的方法。其基本思想是, 输出命令发出后, 立即修改输出状态表。在执行机构动作之前, 程序已调用此保护程序。该保护程序不断地把输出状态表的内容传输到各输出接口中的端口寄存器中, 以维持正确的输出控制。在这种情况下, 虽然有时执行机构的动作有可能破坏状态寄存器的内容, 但由于不断地执行保护程序, 而使得状态寄存器的内容不变, 从而达到正确控制的目的。

## 10.1.5 移动通信设备防干扰

### 10.1.5.1 概述

作为近年来信息技术领域发展最为迅速的无线通信包括移动通信技术,彻底改变了人们的生活方式和工作方式,各种无线通信设备已经是人们日常生活中不可或缺的联络工具。由此而来,相关的干扰问题也就愈来愈多,愈来愈复杂。如果不能很好地规划、设计,无线设备与非无线设备之间,无线设备与人之间都会存在严重干扰的问题:性能恶化、相互干扰、相互破坏、危害健康。

1. 鉴于移动通信信号自身的特点,可将其所受干扰按如下方法进行分类

(1) 从频段上分,可分为上行干扰与下行干扰 上行干扰定义为干扰信号在移动网络上行频段,移动基站受外界射频干扰源干扰。上行干扰的后果是造成基站覆盖率的降低。物理上看,手机在无上行干扰的情况下,基站能够接收相距较远处的手机信号。当上行干扰出现时,手机信号需强于干扰信号,基站才能与手机联络,因此手机必须离基站更近。下行干扰是指干扰源所发干扰信号在移动网络下行频段,手机接收到干扰信号,无法区分正常基站信号,使手机与基站联络中断,造成掉话或无法登记。由于基站下行信号通常较强,对 GSM 来说,当某一下行频点被干扰时,手机能够选择次强频点,与其他基站联络。而 CDMA 本身即自扰系统,因此上行干扰的危害比下行干扰更严重。

(2) 从频点上分,可分为同频干扰与非同频干扰 同频干扰广义上是指干扰源占用的频率恰好与正常信号频率相同,上行下行都存在。但在移动通信网络中,同频干扰特指 GSM 制式中不同基站同一频点的下行信号在同一小区出现,使手机无法区分不同的基站,形成干扰。由于 GSM 制式采用多频点复用,相邻小区不会用同一频点。但远处小区功率控制出现问题时,远处小区同频点信号可能干扰到本小区。干扰信号与正常信号频谱完全相同,很难直接从频谱上判断同频干扰的存在。因此要想测试同频干扰,一种方法是中断本小区被干扰的频点,若频谱上仍然在该频点有信号,就能确定同频干扰的存在,并进一步定位出同频干扰基站。另一种方法是利用路测系统的测试手机,解读 BSIC 码,从而确定同频干扰的存在。这种方法无须中断业务,可以快速定性。同频干扰还可能因为多径传输而产生。这种情况下,中断业务时,多径信号同时中断,BSIC 码也相同,给测试造成难度。只能利用定向测试,发现该信号除在基站方向外的另一较强的方向,再通过分析地理环境作进一步判断。

(3) 从干扰源分,可分为固定频率干扰、随机宽带干扰、强信号对弱信号的干扰以及互调干扰等 固定频率干扰是指具有固定频率的干扰源工作于移动通信频段。这种干扰频率几乎不变,或小范围抖动,上下行都可能存在;随机宽带干扰,是指具有宽频带或频率随机变化的干扰源工作于移动通信频段,这种干扰幅度起伏不定,频率随机飘动,主要存在于上行;强信号对弱信号的干扰,是指合法的信号占用合法的频率,由于功率过强,造成邻近频段接收设备阻塞;或由于强信号杂散辐射过宽,造成对邻接频段的干扰;互调干扰,是由于外部一个或多个无线信号源经由馈缆进入接收装置的非线性放大器所产生的相调制干扰。

凡是能对无线电频率进行分析的仪器都能测试干扰,例如,通用的频谱仪、测试接收机、场强仪等。针对移动通信网络,路测仪、移动基站本身的网管系统也具有发现干扰的能力。基站测试仪、天馈线测试仪是测试基站自身问题的手段。各种测试工具是相辅相成的关系,不具备排他性。测试干扰所用的手段越齐全,越有利于干扰的查找。

## 2. 必须解决的一些防干扰问题

移动通信技术必须解决一些关键的防干扰问题,使得技术的发展建立在一个合理的基础结构之上,既兼顾到各种无线电技术不同种类之间的防干扰问题,也兼顾到今天和将来技术持续性发展的电子设备防干扰问题。研究工作必然包括系统内部防干扰和系统之间的防干扰两个方面。作为一个系统,特别具有高频器件和电路的无线电系统,其内部的干扰问题非常复杂。对于高速信息传输系统尤其要给予重视。另外,一些关键的、来自于系统之间的防干扰问题也必须引起重视。

### (1) 宽带无线通信系统与窄带无线系统之间的防干扰问题

900MHz 频段和 1 800MHz 频段之间是一种倍频或者准倍频关系,低次谐波之间会出现近似相等的情况,影响严重。

### (2) 移动通信系统、无线接入系统、无绳寻呼系统之间的防干扰问题

移动通信系统工程与寻呼系统、包括高速 Flex 系统,这些寻呼系统发射功率大,基站多,影响面大。这些因素会对移动通信系统/城市无线本地接入系统产生重要影响。而 DECT、PHS、PACS 等无绳系统的迅速发展,将使得本就已经严重的兼容性问题更加恶化。

### (3) 地面无线电系统、同温层系统和卫星系统之间的防干扰问题

中低轨道系统由于直接与地面终端通信,到达地面的功率远高于目前的同步轨道系统,因而与地面无线电通信系统之间的兼容问题将是全球通信网、特别是移动通信网成败的关键。

### (4) 宽带、超高速移动信息其他系统之间的防干扰问题

宽带防干扰的研究是非常重要的工作,一方面是为了提高宽带移动业务的可靠性;另一方面是为了降低宽带业务系统设备内部、移动网内部、移动网之间、移动网和非移动网之间、移动通信和非通信业务设备之间的干扰,提高信息的保密性。

### (5) 无线电系统与其他系统之间的防干扰问题

其他系统很多,包括家用电器、军事通信、医院设备、广播等,虽然已经制定一些相关的法律,比如禁止在医院、机场、飞机上、军事重地等使用移动电话,但干扰的问题从来就没有停止过。

## 3. 移动通信电子设备的防干扰研究

总括起来,为了提高移动通信电子设备对于信息社会信息传输和信息保障的能力,实现移动通信事业的良性发展,当前和今后应对移动通信电子设备的防干扰进行以下方面的研究。

(1) 电子设备内部和外部、电子设备之间的工作频谱设计、寄生信号和非线性发射及感应结构的研究。

(2) 各种移动通信网络的防干扰概念和标准的研究。

(3) 面向对象,尤其是宽带系统电磁兼容模型、分析方法和实验方案的研究。

(4) 满足防干扰标准的宽带移动通信系统与网络的概念、定义和方案的研究与提出。

开展这些工作的目的,旨在提高新移动通信业务的可靠性和广泛的可应用性,制定无线电业务的防干扰定义、概念和标准,提高无线电通信业务对于信息社会信息传输和信息保障的能力,实现良性的无线电通信系统的发展。

### 10.1.5.2 移动电话的电磁辐射及防护

手机是现代人们生活和工作中常用的一种通信工具,越来越普及。全球目前有 30 亿移动电话用户,而中国的移动电话拥有量已经跃升为全球第一。越来越多的人依赖于移动电话通信的快捷与方便,正是因为移动电话用户数量如此之大,即便是移动电话对人体很小的影响也会引发公众的关注。



使用手机进行呼叫时，移动电话会发射无线电波（也称为射频能量）。这些无线电波可被距离最近的基站接收，一旦基站接收到移动电话传来的无线电波，就会将其传输到交换台，交换台根据当前呼叫的类型将呼叫转接到另一个基站或固定电话线网络，从而实现通话——这就是移动电话的工作原理。当人们使用手机时，手机会向发射基站传送无线电波，而任何一种无线电波或多或少的会被人体吸收，从而改变人体组织，有可能对人体的健康带来影响，这些电波就被称为手机辐射。

移动电话发出的低强度辐射影响大脑或神经细胞中传送信息的化学物质，由于这些物质带有电荷，因此射线会影响它们的功能。手机辐射会危害人脑的认知能力、记忆力与注意力，驾驶机动车时使用手机影响更大。科研人员在英国皇家医院也进行了移动电话志愿者实验，他们头部被连接一发射器，然后在一小时内，一半人接受 915MHz 移动电话发出的微波，一半人不接受；紧接着接受有关心理检测，以判断大脑受影响情况。结果表明，没有接受微波辐射的一组人记忆力、注意力都优于或同于以前，而接受的一组人则普遍不如以前。

美国 26 家移动电话公司拨款两亿美元，资助一项手机对健康影响的研究，结果发现：手机使用者患脑癌致死的机会较高，患脑外肿瘤的概率更是增加了两倍。脑部右边生肿瘤，可能跟人们把手机贴在右耳来接听有关。但这些公司一直没有就报告结果采取适当措施，保护消费者。

手机的低度辐射会加速细胞的活动。当细胞受到影响时，生物的防御系统就会启动，产生白蛋白用以保护和修补细胞。而对于频繁使用手机的人来说，如果细胞修补活动过剧，就会出现过早衰老的现象。手机长期挂在腰部，电磁波持续接收和发射，会影响肾脏和女性的卵巢。男性应避免把手机放在前裤袋内，因为那里离睾丸和输精管太近。

通过以上可以看出，手机辐射对人体健康的危害是客观存在的严重社会问题，它不会因为手机产业的刻意隐瞒与回避就可以消失。

手机分为外置天线和内置天线两种。在手机顶部的天线附近，形成较强的电磁辐射。由于手机使用时很贴近头部，尤其是靠近人体对电磁辐射比较敏感的大脑和眼睛，因此广大使用者有所担心是可以理解的。

电磁辐射的大小，除与手机类型和品牌有关外，也与离基站的远近和手机的方位有关。距离近则辐射小，距离远则辐射大。手机电磁辐射有近场和远场之分，远场主要影响通信距离，对持机者来说，有影响的主要是近场。通常，应根据手机电磁辐射卫生标准及手机电磁辐射测试方法标准，用全向宽带场强仪进行测试。测试结果及防护措施如下：

（1）手机使用过程中，其电磁辐射以手机振铃开始时最大，此后逐渐减小。因此，手机拨通后的最初几秒，例如 5~10s 内，最好不要将手机贴耳接听。

（2）通话时，声调高，说话响而快，则电磁辐射较大。

（3）内置天线手机的电磁辐射比外置天线手机约低半个到一个数量级。对内置天线手机而言，以手机背面的电磁辐射为大（最大辐射达  $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ），前面仅为背后的几分之一。对外置天线而言，天线周围的电磁辐射为最大。

（4）CDMA 手机的电磁辐射比 GSM 手机约低一个数量级。

关于手机电磁辐射的防护，目前最有效的防护措施是使用带小麦克风的耳机，它避免了手机对头部的近距离电磁辐射。

### 10.1.5.3 移动通信网干扰的形成及抑制

移动通信新技术不断得到应用，新的移动通信网络日益发展，射频资源日趋紧张，各种潜在

的干扰源正以惊人的速度不断产生。原有的专用无线电系统占用现有频率资源、不同运营商网络配置不当、发信机自身设置问题、小区重叠、电磁环境以及有意干扰，都是移动通信网络射频干扰产生的原因。本质上是未获得频率分配允许的信号占据了合法信号的频率，造成合法信号无法正常工作。

### 1. 邻道干扰

邻道干扰是来自相邻波道的干扰信号。其原因是由于收信机选择性差，或者是邻道发信机频带过宽造成的（这种干扰一般来源于 2~3km 范围内的发信电台）。对于前者，可以靠提高收信机的选择性来消除；而后者只能以限制相邻频道发信机带宽的方法加以解决。所有这些，只有通过提高收、发信机的设计要求和技术指标才能实现。

### 2. 发信机噪声

发信机噪声，是以载频为中心，分布在数十千赫到数兆赫频率范围之内，对其他收信机造成干扰的信号。发信机噪声的大小，主要由振荡器的信噪比和串入倍频器、调制器的噪声来决定的。为了降低发信机的噪声，一是要选择好振荡器的供电电源（采用稳压电源、加滤波器等），二是要减少倍频次数。

### 3. 发信机的寄生辐射和收信机的寄生响应

#### （1）发信机的寄生辐射

在移动通信中，VHF 和 UHF 的频率是通过主振频率的几次倍频取得的。倍频器和倍频放大器都具有很强的非线性特性，所以产生了大量的谐波。当发信机的滤波特性不良时，这些谐波便随载波一同辐射出去，造成谐波干扰。这种干扰可能在发信机所需信号带外的一个或多个频点上产生。谐波越是接近有用信号频率（工作频率），干扰就越大。克服的办法包括使用高性能滤波器、改变倍频顺序和在可能的情况下尽量减少倍频次数、避免发信机后面各级过载等。

#### （2）收信机的寄生响应

收信机接收其他不需要频率信号的能力，称为寄生响应。在超外差收信机中，产生寄生影响的因素主要有镜像频率、中频频率以及倍频后产生的寄生谐波分量等。为了抑制寄生响应，应提高收信机的选择性，减少倍频次数。

### 4. 互调干扰

#### （1）互调干扰的定义

所谓互调干扰，是指当两个或两个以上频率的信号同时输入收、发信机时，由于电路的非线性而产生第三个频率称为互调频率  $f_0$ ，若频率  $f_0$  恰好落入某个电台的工作频率上，该台将受到干扰，即互调干扰。互调干扰可分三类：

① 发信机互调。在有效的作用距离之内，一部或多部发信机发出的信号，通过天线和某途径侵入另一部发信机中，并在后者的末级功率放大器的非线性作用下相互调制，产生不需要的频率组合，随同有用信号发射出去，在收信机内反映出干扰。

② 收信机互调。当两个或多个信号同时进入收信机前端电路时，在非线性电路（如高频放大，混频等）作用下发生互调，当互调产物落入收信机中频通带内，便产生收信机互调干扰。

③ 锈栓效应。由于天线、馈线、高频滤波器接触不良或不同金属相接触等非线性因素造成的相互调制。此种干扰只要在施工中注重质量，在运行中加强维护管理，是可以避免的。

互调干扰有奇次互调和偶次互调之分。由于偶次互调， $f_0$  离使用频段较远，故可不予考虑，而主要考虑奇次互调中的三阶互调。尤其是三阶二型互调，其幅值大，干扰影响严重。

## (2) 减小互调干扰的措施

要想从根本上消除互调干扰是十分困难的,但通过采取一定措施也可减轻其影响。

① 提高设备的抗互调干扰能力。一是尽量使各电台天线间的距离拉大,以增大电台间的耦合损耗;二是净化发信机输出电波,提高收信机选择性,以增大设备的线性度,压低互调分量电平。

② 提高通信网抗互调能力。一是选择无互调频率序列;二是分区协调使用频率;三是利用分集接收技术;四是采用收、发异频体制。

## 5. 同频道干扰(同信道干扰)

同频道干扰是指凡载波频率与有用信号的载波频率相同,并以相同的方式进入收信机中频通带的非有用信号所造成的干扰,都称为同频干扰。这种干扰,在收信机中干扰信号与有用信号等同时被放大、检波和输出,这就降低了收信机的信噪比。当干扰信号足够大时,可造成收信机的阻塞干扰;当两个同频率的调频信号出现载差时,引起差拍干扰,收信机的低频输出端将出现拍频或啸叫声;当调频台的调制度和调制信号相位差不同时,收信机的信纳比下降,信号失真。

### (1) 载频差干扰

在同一频道内,当两个载频差为 $\Delta f_0$ 的调频电台信号同时进入收信机时,两个信号将进行叠加,合成后的信号在原来纯正的等幅调频波基础上,又增加了一个频率为 $\Delta f_0$ 的包络,检波后输出一个频率为 $\Delta f_0$ 的差拍干扰。

### (2) 调制度差干扰

当载频相同,频偏不同的两个调频信号同时进入收信机以后,输出端将出现由有用信号同干扰信号的合成信号。该信号的幅度与两个信号的调制度之差有关。

### (3) 调制信号相位差干扰

当载频相同,频偏一致、接收点电场强度相等的两个调频信号进入接收机以后,输出端的信纳比将随着二者调制信号相位差而变化。为了避免同频道干扰,在重复使用频率的通信网中,分配给相同频率的两个基地台之间最小距离应是通信距离的4~5倍。

## 10.1.5.4 CDMA 直放站干扰分析

### 1. 下行干扰

通常下行干扰发生在无线同频直放站,当施主天线和重发天线隔离度小于直放站的增益时(如80dB)时,直放站会自激,产生下行干扰。直放站自激时,轻则是直放站的覆盖区通话音质变差,接通率下降,掉话率上升;严重时使施主基站和其周围的基站发生瘫痪。

施主天线从施主基站接收频率为 $f$ 的下行信号,经过增益为 $G$ 的直放站放大后,由重发天线发出去。一部分信号再经过重发天线的后瓣(副瓣)耦合到施主天线的后瓣(副瓣),再由直放站放大。这样无线同频直放站就形成一个潜在的正反馈环路。

避免下行干扰的主要措施是增大直放站隔离度。一般采用以下措施增大施主天线和重发天线之间隔离度:

- (1) 采用前后比大的天线。
- (2) 采用旁瓣抑制比大的天线。
- (3) 增大两天线的安装距离。
- (4) 安装天线时,两天线尽量背对背。
- (5) 采用隔离网或建筑物隔离两天线。

## 2. 上行干扰

当直放站的放大倍数或噪声系数过大时,上行背景噪声被不合理地放大,在施主扇区的接收端形成较强的上行背景噪声干扰。直放站的引入使基站噪声电平提高,接收机灵敏度降低,施主基站覆盖范围缩小。一般性能较好的直放站上下行的噪声系数都应小于 5dB,直放站的噪声经过放大(直放站的上行增益)和有效路径损耗后进入基站,和基站接收机的噪声叠加就会提高接收机的噪声电平。

直放站的注入噪声取决于直放站的增益及直放站和施主基站间的级联噪声系数,直放站噪声和基站接收机噪声二者之间的关系称为噪声注入裕量。噪声注入裕量的值决定了直放站对施主基站上行链路的影响。每增加 1dB 就意味着该施主基站的上行链路功率减少 1dB,或所允许的基站到手机的空间路径损耗减少 1dB,对小区覆盖范围来讲,会引起上行覆盖半径减小,对基站覆盖区的用户来讲,手机的发射功率会相应增大,或者处在小区边缘的用户发生单通、上行话音质量下降或掉话等现象。

一旦直放站的位置和施主基站确定,唯一的变量是直放站的增益,由直放站发出到达基站接收机口的噪声电平完全取决于直放站的反相增益设置,这样实际应用中可以调整直放站上行增益来减小对基站的影响。以下是直放站引起基站热噪声电平升高与噪声注入裕量的关系:

- (1) 如果直放站增益增加,直放站的范围将增加,基站的噪声提升也将增加。
- (2) 如果直放站的增益降低,直放站的范围也降低,基站的噪声提升也将减少。

直放站增益设置值比有效路径损耗值越小,直放站对基站的影响就越小,此时直放站的输出功率比基站功率低。

在城区中,基站布置密集,有效路径损耗小,直放站不能工作在高输出电平状态。因而在城区的直放站的调整过程中,应在满足覆盖的前提下尽量降低前向的增益。

减小上行干扰的主要措施是降低直放站的增益值,调整直放站增益使其对施主基站的热噪声引入在 0.3dB 以下,直放站就不会对施主基站产生较大影响。

## 3. 典型案例分析

(1) 现象:直放站覆盖区,手机接入网络时间过长,有时甚至达到几十秒,尤其是在光纤距离过长的直放站;或者接入成功率过低。

分析:直放站反向增益设置值不合适。

处理方法:直放站反向增益设置值不合适,通过适当调整直放站反向增益值,可以缩短手机接入时间,提高接入成功率。

通过适当调整基站接入参数,提高手机接入成功率。例如,增大接入参数 ACC\_TMO 来增加移动台等待基站确认的时间;增大 PWR\_STEP 使得移动台能在更短时间内达到需要的发射功率;增大 PAM\_SZ 和 MAX\_CAP\_SZ 值来增加单个探针的持续时间。

(2) 现象:直放站覆盖区,手机显示导频很多而且手机经常频繁切换。

分析:这由于直放站施主天线收到多导频信号,产生导频污染所致。解决导频污染是在 CDMA 网络优化中至关重要的工作,只有解决导频污染,才能提高 ECIO、FER。

处理方法:调整直放站施主天线,使其收到基站单一导频信号。

调整基站天线方向,使天线方向冲着直放站施主天线方向,或者降低某个导频的强度,保证直放站接收单一导频信号。

(3) 现象:直放站前向功率放大器经常自动关闭。

分析:直放站功率放大器过载,造成直放站前向功率放大器经常自动关闭。

处理方法：降低直放站前向增益值，直放站的最大设置前向增益受天线隔离度的限制，如果为了追求最大的覆盖范围，前向增益设置过大，则直放站自激。施主基站输出功率的突然放大，导致直放站过载。

检查施主基站的输出功率平稳度。

(4) 现象：直放站对施主基站的注入噪声过大。

分析：所有的直放站都会对施主基站的前向和反向链路增加进去噪声，降低施主基站的灵敏度。直放站到基站的链路一定要设计成既能实现直放站最大的覆盖区域，又能对施主基站产生最小的噪声提升。前向链路信噪比较高，直放站的噪声对该链路影响是很小的，而反向链路直放站噪声必须要小，寻求平衡直放站覆盖范围和由它引起的施主基站的噪声提升二者关系的一个合适的平衡点。

处理方法：适当调整直放站反向增益值。

### 10.1.5.5 3.5GHz 频段无线接入系统干扰分析

3.5GHz 系统使运营商增强了市场的快速接入的反应能力，但随之而来的问题就是如何科学有效地规避频率间的干扰。在分析频率干扰之前，首先介绍抗频率干扰通常采用的五种方式。

(1) 频率隔离 通过规划不同的扇区、不同的远端站使用不同的频率来达到频率隔离的目的。目前系统发信机的邻道功率指标和收信机的相邻信道选择性均可做到 30dB 左右，因此，使用不同的频率是最好的抗干扰手段之一。

(2) 距离隔离 无线电波在传输中遇到不同介质的界面时会产生反射，导致反射损耗，在使用平面大地模型计算场强时，电波传播损耗与收发天线间距离的四次方成反比，即每倍程的电波传播损耗为 12dB。3.5GHz 系统传输距离一般不超过 10km，因此，同频信号复用的距离越大，系统抗干扰的能力也就越强。

(3) 极化隔离 通过使用载波的不同极化方式来加大载波间的隔离度。目前 3.5GHz 系统天线的极化隔离可以达到 25dB 左右。

(4) 方向隔离 通过使用扇区天线或定向天线的不同朝向来对载波发射和接收方向加以区分。目前基站天线的前背比可达到 25dB 左右，远端站天线的前背比可达做到 22dB 左右。

(5) 其他 在实施中还可依据具体地形地物进行隔离以减少干扰，并通过调整基站发射功率、天线高度、天线倾角来控制基站覆盖范围以减少不同基站覆盖的交叠区和越区现象。

目前，3.5GHz 频段地面固定无线接入系统在每个城市中可使用的带宽为 31.5MHz，被三家运营商平分后每个网络仅可使用 10.5MHz 的带宽来组网。由于带宽窄、频点少，且每个网络所使用的频率中都有一部分与其他网络属于邻频，这就要求运营企业在进行频率规划时要着重考虑如何克服频率干扰问题。

3.5GHz 系统存在的频率干扰主要有同频干扰、邻频干扰、带外干扰、互调干扰和阻塞干扰五种。同频干扰和邻频干扰主要取决于系统的信干比(S/I)指标，在分析时重点研究这两种频率干扰。对于带外干扰，通过设备自身就可抑制除去；对于互调干扰，此系统本身频点较少不易产生，且频带窄设备自身可以抑制掉；对于阻塞干扰，通过设备的自动功率控制功能可以抑制。下面将按干扰来源分别分析系统内部干扰、相邻系统间的干扰以及来自系统外部的干扰。

#### 1. 3.5GHz 系统内部干扰分析

同一基站多扇区系统的干扰包括相邻扇区之间的邻频不同极化干扰、相邻扇区之间的邻频同极化干扰和相隔扇区之间的同频干扰三种。邻频的干扰信号电平只要不大于主信号电平 15dB，系

统就不会受到邻频不同极化的频率干扰,因此,设备指标完全可以满足通信载干比的要求而正常工作。

第一、第二种频率干扰在具体应用过程中,不同扇区中的远端站离基站的远近也会使干扰的强度有所差别。在同等接收、发射条件下,根据自由空间频率衰耗公式  $L=92.45+20\lg d+20\lg f$  可知,两个远端站到基站的接收电平差大于 16dB,离基站较近的远端站对相邻扇区可能会产生干扰。若不同远端站的距离到基站的距离基本相同,且发射电平也相同,则相邻扇区产生的干扰不会对其他远端站造成危害;若不同远端站到基站的距离不同,则应调整基站发射功率,保证不同扇区的发射功率一致,以避免高功率扇区对低功率扇区的抑制;同时远端站应采用 ATPC 技术,使不同距离、不同扇区的远端站到达基站接收机的电平相等,从而减小扇区之间的干扰。

第三种频率干扰在具体应用过程中,当基站扇区角度小于  $30^\circ$  且远端站天线性能较差时,接收机在接收的主信号电平与其他扇区来的同频干扰电平之差小于 21dB 时会产生同频干扰,这种情况下应选择高性能天线,增大天线的前/背比来消除干扰。若天线指标不能完全满足要求,还可采用不同的极化来增加其隔离度以确保系统满足干扰指标的要求。

## 2. 同一运营商不同基站的干扰分析

在同一运营商不同基站之间形成的干扰按形成的原因可组合为八种:同频同极化同向的频率干扰;同频不同极化同向的频率干扰;同频同极化不同向的频率干扰;同频不同极化不同向的频率干扰;邻频同极化同向的频率干扰;邻频不同极化同向的频率干扰;邻频同极化不同向的频率干扰;邻频不同极化不同向的频率干扰。

通过采用频率隔离、距离隔离、极化隔离、方向隔离四种方式来抗频率干扰后,同频不同极化同向的频率干扰、同频不同极化不同向的频率干扰、邻频不同极化同向的频率干扰、邻频不同极化不同向的频率干扰这四种干扰的影响很小,另四种较为严重的干扰在具体应用实施中可采取的措施如下:

(1) 多基站间进行频率的优化配置,不同基站的相邻或重叠扇区采用不同频率组,防止同频干扰,并在邻频间采用不同极化方式,防止邻频干扰。

(2) 合理规划扇区布局,尽可能地降低基站发射功率,降低不同基站间的越区干扰,同时选用高性能天线,合理调整天线方向与扇区布局,控制同频和邻频干扰。

(3) 合理选择基站位置,利用建筑物的阻挡以降低不同蜂窝间的干扰。

## 3. 不同运营商系统之间的干扰分析

在实际应用中,每城市有三家不同运营商建设的网络,频率使用相邻且无保护频带,因此三个网络之间不存在同频干扰问题,只有产生来自边缘的邻频干扰。依据运营商基站设站位置和覆盖范围,系统之间的干扰可分为相邻基站间的干扰、相邻基站对远端站的干扰、远端站对相邻基站的干扰三类。

(1) 两个运营商基站位置不同,扇区方向基本相同且不存在重叠覆盖区域

如果一个系统的无线设备发射功率相对其他系统设备来说较大,则其他系统可采用不同极化方式、不同频率来加大信号间的隔离度,解决干扰问题。

(2) 两个运营商基站位置不同,扇区方向基本相同且存在重叠的覆盖区域

这种情况下由于距离远近的不同会使远端站处的干扰信号会比有用信号大的多,为了保证基站之间有足够的垂直和水平距离,邻频的干扰信号电平应不大于主信号电平 15dB 以上,以此来保证系统的误码率。

(3) 两个运营商基站位置相同,扇区方向基本相同且存在重叠的覆盖区域

这种情况下由于两个网络的基站设置很近,两系统信号电平之差会大于 15dB,因此要尽量选择可用频点中相差较大的,还可采用不同极化方式来加以解决。

以上三种频率干扰在实际运用中,最好在建网初期进行彼此间的充分协调,把发生干扰的可能性消灭在萌芽状态。若建设后网络中出现系统间的干扰,一方面尽可能使用与干扰系统非相邻的频点,错开邻频;另一方面应尽量降低基站和远端站的发射功率,减少对其他基站不必要的干扰。

#### 4. 3.5GHz 系统与其他系统间的干扰分析

3.5GHz 系统与其他系统间出现的干扰信号,按来源方向可分为地波干扰和天波干扰两种。地波的干扰信号可以通过架设屏蔽网的方法来消除。天波干扰信号主要是来自卫星通信 C 波段扩展信道信号、微波接力通信信号,因此可采用高方向性的天线,使 3.5GHz 系统的天线波束与水平面垂直方向角度在  $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$  的夹角内,使本系统对天波的干扰信号波束在水平方向上不重叠,从而避免天波的干扰。

在实际应用中,对基站要在确定站址后先期进行站址的电磁环境测试,避开存在干扰的区域,再进行系统安装。远端站在进行安装前,要尽量远离那些可能产生干扰的系统的干扰源,并采用方向、距离、地形地物等隔离手段来减小干扰源对系统的影响,同时通过预留一定的信号强度余量来减小对系统的影响。

#### 5. 3.5GHz 系统对电磁环境污染的分析

各运营商使用 3.5GHz 系统提供业务时,电磁环境指标必须遵守国家的相关法律法规,包括《电磁辐射防护规定标准》(GB8702—88)、《环境电磁波卫生标准》(GB9175—88)、《中华人民共和国环境保护法》、《建设项目环境保护管理条例》。3.5GHz 系统还应满足《3.5GHz 固定无线接入系统行业标准》的规定要求,发射功率小于 35dBm,杂散辐射小于-50dBm/-40dBm(基站/终端站),从而保证无线辐射指标满足国家相关部门的要求,同时设备防干扰和安全特性应符合行业标准。

以下是两个主要国家标准中对辐射的规定要求:

(1) 根据国家环境保护局批准实施《电磁辐射防护规定标准》(GB8702—88)的规定要求,在频率范围 3~15GHz 内,基站通过天线发射电磁波对周围产生电磁辐射应符合:“保证基站周围环境的公众照射一天 24h 内导出限值功率密度低于  $0.47\text{W}/\text{m}^2$ 。”

(2) 根据卫生部《环境电磁波卫生标准》(GB9175—88)的规定要求,频率在 300MHz~300GHz 频段内,基站发射天线在居民覆盖区内,射频辐射要求小于  $0.1\text{W}/\text{m}^2$ 。

在具体应用中为尽可能减少干扰因素,3.5GHz 的应用要选用符合国家标准并通过国家相关部门测试的系统设备,通过动态功率控制功能来降低工作时电磁辐射值强度,同时运营企业应与当地相关管理部门联合进行测试,确保系统在对人群无不利影响的情况下正常运行。

## 10.2 电力电子设备防护技术

要说明电力电子设备与一般电子设备在制造工艺上有何不同,就必须先了解电气工程、电子设备与电力电子设备相互之间的关系和各自的特点。电气工程是“研究电工技术和电子技术并将其应用于物质生产和生活的工程技术。主要包括研究电能的转化、传输和分配的电力工程,研究电工设备及其应用的电机工程,研究电子设备及其应用的电子工程,研究通信设备及其应用的通信工程等”。从电力电子技术的定义——“电力学涉及电力变换和开关的领域,无论是否进行功率调节”。

电力电子技术属于电子学的范畴,而又涉及电力和电工,因此,仍属于电气工程。

电力电子技术的理论基础是电力学、电子学与控制学,它是借助于现代控制技术把强电(电力、功率流)与弱电(电子、信息流)有机地结合在一起,并以对电功率进行变换(变频)处理为目的的高科技技术。其实,在通信设备中有很大部分内容也属电力电子技术的研究内容,例如,通信电源设备的研制便是。人们之所以重视电力电子技术、电力电子设备和电力电子工程的研究和发展,其终极目的是为了节能、节材、节水,以提高经济效益和社会效益,并且保护和改善人类赖以生存的自然和生态环境,以实现人类社会的可持续发展实现人类与自然界的和谐统一。

既然电力电子设备及其应用的电力电子工程居于电气工程的一个重要方面,那么在制造工艺上,电力电子设备和一般电子设备为何又有所不同呢?

第一,电力电子设备其核心是电力电子器件,它们都工作在开关状态,在它们开通和关断的瞬间,其电流变化率和电压变化率都是很大的,电路中杂散电容和电感的耦合作用,使得在开通和关断瞬间形成一个频率极高、强度很大的电磁骚扰源,尤其当电力电子器件(或称功率开关器件)工作在高频或特高频状态时,情况更加严重。这一 EMD 通过传导和辐射,将会对其周围的电力电子设备、电子设备、电子计算机、网络设备等产生 EMI,严重时将会使这些设备无法正常工作,这只是问题的一方面;问题的另一方面则是其他电力电子设备产生的 EMD,也会对该电力电子设备产生 EMI,严重时也会使该设备无法正常工作。因此,考虑到 EMC 问题,电力电子设备在其制造工艺上自有其特殊之处。

第二,虽然随着电力电子器件的制造工艺和技术的不断提高,其容量(额定电压、电流),工作频率,应力承受能力亦在不断提高,但是,单只器件的容量终归有限。而在电力电子设备的开发中,为了满足用户的要求,经常需要将电力电子器件串联起来使用,以提高设备的电压定额,例如,在高压直流输电(HVDCT)工程和动态静止无功补偿(SVC)工程中的变流阀;有些场合需要并联起来使用,以提高设备的电流定额,例如,在超高功率的电化装置和电冶装置。在这种情况下,由于电力电子器件参数的分散性,以及变流装置结构布置的局限性,决定了并不是同一型号,同一规格的电力电子器件(例如:晶闸管、整流管)随便就可以串联或并联来使用的。这里也有一般电子设备所没有、而电力电子设备所特有的制造工艺问题,即电力电子器件串联时的静态均压和动态均压问题,并联时的均流问题。

第三,电力电子器件其应力承受能力和热容量总是有限的,一旦损坏,便是永久性的故障,无法恢复,只有更换器件。因此,对电力电子设备的保护主要是围绕电力电子器件进行的,这不仅需要从整个电力电子工程系统出发,进行全面和细致的理论计算和工程设计,而且还需要严格的制造、装配工艺的保证。

### 10.2.1 晶闸管应用设计

单只电子器件允许通过的电流和耐受的电压总是有限的,在高电压输出功率和超高功率的电力电子装置中,必须将器件串联和并联连接,才能满足装置对高电压和强电流的设计要求,而在高电压、强电流的大功率和超高功率应用领域中,目前,尚未出现新的电力电子器件来取代大功率晶闸管和整流二极管。因此,关于器件串联和并联的工艺问题将以晶闸管为例作一介绍。

#### 10.2.1.1 晶闸管的并联

按照现有晶闸管的制造水平,一般情况下对于整流电压  $U_d \leq 1200V$ , 整流电流  $I_d \leq 6kA$  的变



流装置,晶闸管需要并联运行。至于具体关联的数量,则要根据所要求的 $I_d$ 数值、冷却方式、晶闸管和快速熔断器参数的配合及其成本核算,并结合变流设备系统的短路电流水平、短路故障的保护配合,综合进行计算后决定。

晶闸管并联运行,主要是解决并联器件之间的均流问题,即并联的器件应尽可能均衡地分担负载电流,以避免由于不均流造成个别器件过载、过热而被损坏的情况发生。

晶闸管并联不均流情况的发生主要是由于并联器件通态伏安特性的差异、开通时间的差异,以及各并联支路阻抗的差异等综合作用的结果,造成了并联器件之间稳态及暂态电流分配的不均衡。为了解决这些差异造成的电流分配不均,在装置的工艺设计上应从下述几个方面入手。

### (1) 变流装置主电路的配置与柜体的结构设计

首先,各并联支路要配置合理,尽可能使同一变流臂中各个并联支路从交流进线经过晶闸管、快速熔断器到直流输出母线的路径长度是相等的,即采取上进下出或下进上出的配置,以减小每个并联支路阻抗的差异。

其次,适当增大交流各相母线之间,以及母线与柜体之间的距离,以减小各相换流过程中急剧变化的电流产生急剧变化的磁场对相邻相并联臂中器件间电流均衡度的影响。对于超高功率的电化、电冶整流装置,可以采用同相逆并联的主电路结构(当然整流变压器也应是同相逆并联结构),以减小强电磁场对电流均衡度的影响。具体设计要防止涡流损耗。对置于净化厂房中的变流装置,可以采用无柜体的敞开式、支撑式结构。

### (2) 晶闸管参数的选择

针对晶闸管通态伏安特性的差异,每个并联臂中各支路晶闸管的通态峰值电压 $U_{TM}$ 之差要尽可能小,一般不大于 $0.05V$ 。对于多个器件并联,且并联路径相等的情况下,并联器件的 $U_{TM}$ 应从中间向两边逐渐增大。这是因为,虽然通流路径相等,但处于并联臂中间位置的路径互感较大的缘故。

### (3) 改进门极触发电路

一般是指从触发电路的设计上加大门极触发功率,比如,提高触发脉冲前沿的陡度和幅值,适当加宽触发脉冲的持续时间,或采用补脉冲方式的双脉冲触发。这主要是为了改善晶闸管开通时间差异的不足,起到减小开通时间分散性的作用。

### (4) 强迫均流

在采取了(1)~(3)的措施后,仍有可能无法使变流装置的均流系数达到设计要求,这在并联器件数目较多的情况下,时有发生。为此,可采用强迫均流措施。一般常用的方法是在电流冒尖的并联支路中串联一个阳极电抗器,把冒尖电流压下来,该电抗器可以通过将器件连接母线改成曲折形,或在连接每线上直接套铁氧体磁环、环形铁来实现。串联电抗器强迫均流的效果较好,缺点是增加了功耗和噪声。

### (5) 保证晶闸管与散热器之间的安装压力

在晶闸管并联组装时,从工艺上一定要能保证器件的安装压力,特别是对于大功率的平板型器件直接压装在水冷母线上的这种结构。因为,器件的参数都是在散热器保持一定的安装压力下测得的,安装压力不够将直接影响器件的通态峰值电压 $U_{TM}$ ,进而影响并联器件的均流系数。对于平板型器件与散热器之间的压紧力,可根据器件与散热器的接触面积,按照 $10.7MPa$ 的压力计算得到,以保证器件与散热器之间压力的工艺结构要求,采用可以测得器件与散热器之间安装压力的专用工艺器具。

### 10.2.1.2 晶闸管的串联

电力电子技术的发展,促进了输变电技术的发展。电力电子技术已经进入高电压领域,诸如 HVDC、SVC 中的高压交流阀等。在高压输变电领域中,主要还是应用晶闸管(包括光控晶闸管);为了适应高电压,晶闸管串联运行则是不可避免的。

按照现有晶闸管的制造水平(8kV/3kA),欲用于 $\pm 500\text{kV}$ 的直流输电工程,或用于 AC 35kV、100kV、220kV 的动态静止无功补偿工程的交流阀中,晶闸管的串联数是相当可观的。至于具体的串联数,则要根据电力系统的电压、电压波动范围、暂态过电压、交流阀的换相过电压、避雷器的保护水平等,作出交流阀的绝缘配合后,才能确定。

晶闸管串联组成的交流阀在运行时,主要是解决串联的晶闸管之间的静态和动态均压问题。所谓静态均压是指晶闸管处于正向阻断和反向阻断状态时的均压;所谓动态均压是指晶闸管处于开通和关断的换相期间的均压。对于交流阀中串联的晶闸管,无论在静态还是在动态,都要均衡地分担施加在交流阀两端的交流或直流电压,以防止由于电压分担不均衡造成个别晶闸管所承担的电压超过其  $U_{\text{KRM}}/U_{\text{RRM}}$  而被击穿,使剩余的晶闸管所承担的电压重新分配而升高。当电压分配严重不均衡时,可能会引起连锁的击穿现象,以至最终导致整个交流阀被击穿。

#### (1) 静态(稳态)均压

静态不均压是由于晶闸管伏安特性的分散性造成的。静态均压是采用强迫均压措施,使得串联的各个晶闸管所分担的电压基本趋于均衡,而不受其伏安特性分散性的影响。静态均压通常是采用给每只串联的晶闸管并联一只阻值相等的均压电阻  $R_{\text{P1}}$  的办法来解决的。 $R_{\text{P1}}$  阻值的大小,取决于串联晶闸管中漏电流的最大值,即使通过  $R_{\text{P1}}$  的电流值远大于晶闸管漏电流的最大值,而起到强迫均压的作用。一般情况下,在  $U_{\text{DRM}}(U_{\text{RRM}})$  作用下,计算出通过  $R_{\text{P1}}$  的电流为串联晶闸管中漏电流最大值的 10 倍时的  $R_{\text{P1}}$  值,即可使串联均压系数  $K_{\text{V}} > 0.9$ 。

另外,需要注意的是静态均压电阻应选用无感电阻,以减小均压电路在换相过程中产生的振荡过电压对晶闸管的危害,特别是在高压电流输电和动态静止无功补偿中的交流阀中。

#### (2) 动态(暂态)均压

动态不均压是由于晶闸管开通特性和关断特性的分散性造成的。动态均压也是采用强迫均压措施,使得串联的各个晶闸管在换相的短暂瞬间,所分担的电压基本趋于均衡,而不受各个晶闸管的开通时间  $t_{\text{on}}$  和关断时间  $t_{\text{off}}$  的影响。

动态均压是要解决在换相的短暂时间(对于工频 50Hz 来讲,换相时间一般在  $550 \sim 825\mu\text{s}$  之间)内的均压问题,自然会想到采用电压不能突变的组件——电容来进行强迫均压,即在串联运行的每个晶闸管的 A、K 之间并联一只电容  $C_{\text{P}}$ ,以延缓先开通(或先关断)晶闸管阀端电压的转移(或上升)。另外,考虑到晶闸管开通时  $C_{\text{P}}$  要通过它放电,为了减轻  $C_{\text{P}}$  放电电流应力对晶闸管线极区的冲击,为此,再增加一只电阻  $R_{\text{P2}}$  与  $C_{\text{P}}$  串联,组成动态均压电路。

### 10.2.1.3 晶闸管的保护

#### 1. 过电流和短路保护

晶闸管最高工作结温  $150^{\circ}\text{C}$  的限制,决定了其承受浪涌电流的能力差,也决定了其承受过电流和短路的能力差。这是由于,当通过晶闸管的电流超过其额定电流值时,其管芯的温度将迅速上升,如果保护设计不周密,保护措施不完善,则晶闸管轻则短时间内失去阻断能力,重则被热

击穿而永久损坏。

前面介绍的晶闸管并联均流措施,实质上属于过流保护措施,只不过它是为了防止由于并联不均流而造成个别晶闸管过载的情况发生。过电流和短路保护主要分为两类,一类采用保护电器,一类采用电子保护电路。

### (1) 过电流和短路保护电器

常用的保护电器有交流开关(断路器)、过电流继电器、热继电器、快速熔断器(快熔)与直流快速开关(断路器)等。这里仅就快熔和快速开关作一介绍。

① 快速熔断器。主要用于切断电力电子装置内部的短路故障支路。不论变流电路是单拍联结还是双拍联结,只要任何一个变流臂中哪怕只有一只晶闸管被击穿而损坏,则不仅造成该变流臂处于短路状态,而且引起相邻变流臂的短路,这时只有用快熔切断故障支路,进行短路保护。显然,快熔是要和晶闸管直接串联在一起使用的(对于小功率的直流装置,快熔亦可接在双拍联结电路的交流进线中)。快熔参数的选择应遵循下述原则:

- a. 快熔的额定工作电压应大于变流电路侧线电压最大值的 1.1 倍。
- b. 快熔的额定工作电流应大于晶闸管实际最大工作电流(考虑均流系数)方均根值的 1.5 倍。

除此之外,要改善快熔连接母线的冷却条件,比如,在大功率和超高功率的电化和电冶变流装置中采用水冷母线,而将快熔连接母线的两端分别连接在水冷母线和水冷散热器上。

② 直流快速开关。它主要用于切断电力电子装置直流侧的外部短路故障。当直流侧负载或直流母线间发生短路时,直流快速开关在 20~30ms 内即可分断,以保护变流装置。快速开关参数的选择较简单,因为快速开关的额定电压一般为 DC 600V、750V、1 500V 等,额定电流一般为 DC 1 000A、1 500A、2 000A、3 000A、6 000A 等,只要选择额定电压、额定电流高于变流装置的额定电压、额定电流的直流快速开关即可。

### (2) 过电流和短路的电子保护电路

电子式保护电路多种多样,主要分为两类,即截流(限流)式保护和分断(关断)式保护;它们既可用于晶闸管等半控型器件,又可用于 IGBT 等全控型器件。其保护原理为:通过设于变流装置输入(或输出)侧的电流传感器检测负载电流,并将其转换为反馈信号与保护设定值(阈值)相比较,当过流或短路发生时,电流超过阈值,保护电路动作。

截流式保护主要用于过流保护。对于晶闸管移相控制电路,视负载性质的不同而将触发脉冲迅速移相进行限流,并不关断触发脉冲;对于开关(斩波)电路,则是迅速减小占空比限流,也不关断驱动控制电路。

分断式保护主要用于短路保护。分断式保护不论对于晶闸管移相控制电路,还是对于开关电路,都是通过切断触发(驱动)控制电路而使器件输出被切断的。

### 2. 过电压保护

目前,在电力电子器件中,晶闸管是耐受电压能力最高的器件。但是,它耐受电压的能力是很有限的,根本无法和其他电工设备相比。

#### (1) 电力电子设备中的过电压

在电力电子设备中的过电压分为内部过电压和外部过电压两类。产生过电压的原因很多,但对于电力电子器件威胁最大的主要有三种,即属于外过电压的电源开关(断路器)分断时产生的操作过电压、属于内过电压的器件换相时产生的换相过电压或器件工作于斩波(开关)状态下开通关断时产生的关断过电压。

① 操作过电压。主要是指电力电子设备的交流电源开关或直流快速开关分断时产生的过电

压、快熔熔断时产生的过电压。当未采取保护措施时,切除空载变压器时所产生的操作过电压峰值可能达到变压器额定电压峰值的 8~10 倍,这对晶闸管是致命的威胁。

② 换相过电压。晶闸管在换相过程中,由通态向断态转换的瞬间,由于电流的急剧变化而产生较高的  $di/dt$ ,与线路电感、分布电容以及晶闸管的结电容等参数共同作用,一般会产生高频振荡过电压,这对晶闸管也是一个严重的威胁。

③ 关断过电压。全控器件工作于斩波(开关)状态时,关断时产生的过电压。其产生的机理与换相过电压相同。但是,由于其工作在高频状态,不仅有过电压的问题,而且还是一个电磁骚扰源,使电磁兼容性的问题变得复杂了。

至于其他过电压,诸如交流侧持续过电压、直流侧持续过电压,一般不会对晶闸管造成威胁,因为,这种持续过电压的幅值并不是很高,况且,系统的保护也会起作用。

再如雷电过电压,其保护在电力系统中已经是成熟的技术,即使对于交流侧供电电压达到 35kV、100kV、220kV、500kV 的大功率和超高功率的电力电子设备,电子系统的绝缘配合设计与过电压保护设计也保证了大功率和超高功率的电力电子设备不会受到雷电过电压的威胁。而中、小功率的电力电子设备,其交流电源的进线电压不高,通常为 380V,则更不会受到雷电过电压的威胁。

### (2) 操作过电压的保护

对于中、小功率的电力电子装置主要是在其进线开关后和出线开关前;对于大功率和超高功率的电力电子装置主要是在其主变流变压器的阀侧(一般在装置的进线处)或装置的输出处,安装下述保护电路或非线性保护元器件:

① RC、RCD 阻尼(缓冲)电路。

② 整流输出式,直流侧为 RC//C 的阻尼缓冲电路。

③ 过电压抑制器件,诸如雪崩二极管、转折二极管、压敏电阻(ZnO 避雷器)、硒整流硅(对接,双向保护)等。

### (3) 换相过电压与开关过电压的保护

这主要是针对器件进行保护。保护电路或直接串联在晶闸管的阳极,如阳极电抗器,或直接并联在晶闸管两端,如 RC、RCD 缓冲电路。对于由晶闸管串联组成的变流阀,其过电压缓冲电路一般与均压电路合二为一。

### 3. 过热保护

电力电子器件的过热保护主要针对冷却系统进行。对于强迫风冷装置,主要是对风压、风速、风向的监控;对于水冷装置主要是对水压、水流量、水温的监控。另外,对大功率和超高功率的装置还要对母线温度进行监控。通常在装置内安装风速继电器、水压继电器、温度继电器以及张、流量计等进行过热保护。

需要说明的是装置零部件的机械加工质量和装置的装配质量,对于过热保护是很重要的。一些局部过热情况的发生,往往与操作者不严格按照工艺规程要求进行机加工和装配有关,例如,连接母线接触面不平整、安装接触压力不足,都会造成接触电阻增大,引起局部过热。

另外,需要特别提请设计者注意的问题是:在热设计与热保护设计的控制电路中,无论是风冷还是液冷,都应设置延时关断冷却装置的控制电路环节,即主电路关断后,电力电子器件的冷却散热装置还需运行几分钟,以将储存在电力电子器件的余热散发掉,否则将有可能损坏电力电子器件。

## 10.2.2 整流变压器与变流柜设计

整流变压器是电力变流设备（装置）的动力电源变压器，由于变流设备种类较多，故与之配套的变压器类别也多，从大的方面分，有电化、电冶用，交、直传动用，铁道与矿山牵引用，静电除尘用，电焊机用，变频电源用等。从容量上来说，小的几千伏安，中等的几百千伏安，大的上万千伏安；从冷却方式上有干式自然冷却、强风冷却和油浸冷却。从输出相数上有单相、三相还有多相如 6 相、12 相等。整流变压器不同于普通电力变压器而是一种特殊变压器。

### 10.2.2.1 整流变压器的设计要求

整流变压器是为整流器服务的、配套的，对它的要求源自整流器对变压器的要求，归纳起来分为两方面，通用方面和专业方面。通用方面是整流变压器共有的，专业方面是针对某一方产品专用才有的。

#### 1. 通用性要求

(1) 变压器铁芯磁通密度比普通同容量电力变压器要选得低 因为整流变压器的电流为非正弦波，有谐波成分，在铁芯内建立谐波磁势，产生损耗。

(2) 线圈导线的电流密度比普通同容量电力变压器要选得低 由于整流变压器电流为非正弦波，特别是阀侧电流波形与正弦波相比，畸变较大（通常情况下），谐波电流在导线中产生损耗；另外，大型整流变压器的效率指标为 98% 以上，为使效率提高，总损耗就不能大。基于这两方面的原因，线圈电流密度不能选得大。

(3) 变压器的机械强度要高，能承受事故电流的冲击 整流变压器阀侧接有整流管或晶闸管，当整流管（晶闸管）击穿或逆变器换流失败时，瞬间流过很大的事故电流，这电流产生很大的电动势，使变压器线圈及支撑件承受很大的机械力，在这种情况下，变压器不应有大的变形和遭到破坏。

(4) 对变压器的阀侧电压、阻抗电压有要求 变压器的阀侧电压是变流设备设计者根据变流系统的阻抗、损耗、控制性能、设备负荷情况对变压器提出的阀侧空载电压。阻抗电压是变流设备设计者根据系统的保护匹配、损耗提出来的，都是很重要的参数。

(5) 变压器的噪声要低 由于整流变压器内的谐波电流，在铁芯内产生谐波磁通，使磁滞伸缩现象增加；负载的不均衡性如急变负载（轧钢机），矿井提升机负荷使变压器铁芯短时受到较强的机械应力，而产生噪声。一般情况下整流变压器安装地方与整流装置靠近，特别是干式户内安装的整流变压器为了使工作环境安静，因此要求变压器噪声低。

(6) 变压器的连接组 变压器的连接组是变流设备设计者根据整流电路的形式、供电电压、网路对抑制谐波的要求提出来的。一般网侧为三角形连接，阀侧为星形或三角形连接，不采取网侧星形连接、阀侧也是星形连接。

#### 2. 专业方面要求

(1) 多级有载调压 例如电化、电冶方面整流器，由于生产工艺流程的需要，要求整流电压有多级，带负荷调节。如从额定输出电压的 30% 连续、按级调升到 105%。由于阀侧电压低、电流大，往往调压在网侧进行。

(2) 多相输出 例如电化、电冶方面的整流器，容量大，运行时注入电网的谐波电流也大，为了不使谐波电流超过电力网上的规定。由单台变压器组成三相、六相或多台（2~4 台）组成 12

相、24 相、36 相、48 相输出，以抑制谐波，自然各变压器间在技术参数（电压、相位差、阻抗、连接组…）上都有要求，这些要求由变流设备设计者提出。

（3）防腐蚀要求 有的变流装置（含变压器）工作场所有腐蚀性气体，会对变压器的结构材料造成腐蚀，因此，要求防腐蚀。

### 10.2.2.2 整流变压器的安装技术

整流变压器涵盖的容量范围很大，一般 200kVA 以下的低压变压器基本上在柜内安装，容量较大的均在柜外安装，现分述如下：

#### （1）柜内安装的小型变压器

柜内安装的变压器多数是干式自冷型的，或干式水冷型的，通常变压器的重量占整个整流柜（或变流装置）重量的比例很大，故变压器一般居中、居下安装，如有平波电抗器，则电抗器与变压器并排安装，前、后、左、右都要有一定的安全距离。这个距离要适当，一方面为了散热，使变压器、电抗器有足够的空间，使受热气体通过对流与柜外冷的气体交换热量。另一方面，变压器与柜门、壁板距离小时，变压器线圈、母排的电流产生的漏磁通穿过柜门壁板（铁磁物质）构成回路，使其发热，其交变电流又使柜门、壁板颤动，产生噪声。甚至使变压器输出电压达不到要求。

安装变压器时，支承变压器的支撑件，对于小功率变压器为角钢，大功率的用槽钢。变压器要离开地面，使空气流通，以利散热。变压器上有接地螺钉，当柜体接地时，接地螺钉应与柜体接地螺钉连通，与公共接地网相连。

#### （2）柜外安装

柜外安装分室内安装和室外安装两种情况。室内安装的变压器有干式的和油浸两种类型，为了降低损耗，都靠近整流柜（变流装置）放置，这时为了工作人员的安全，防止触及变压器的带电部分（一般柜外安装的变压器网侧电压都较高，如 6kV、10kV、35kV…），应有防护网（干式）和隔离墙（油浸式）。

为了防火，油浸变压器一般不允许安装在生产车间、实验室、研究室内。多数安装在这些场所厂房的外侧、通风好、阳光不直接照射的地方（半开启式），单独占一个变压器室，上方有起吊设备，以便将变压器身吊出，进行检修；下方有混凝土构件支撑变压器，及由混凝土制作的油槽，当变压器漏油或事故状态下大量油溢出时，能储藏变压器油或顺利地流向集油槽内。

变压器与整流器的连接通过穿墙套管或墙上的窗口用母线排与整流柜相连，变压器的接地线通过接地母线与接地网相接。变压器若带有小车，此时支撑变压器的混凝土构件上应敷设钢轨（大型变压器）或槽钢（中、小型变压器）；让变压器小车坐在钢轨（槽钢）上，以便变压器大修时能移出变压器室。平时变压器应牢牢固定在钢轨（槽钢）上，不能随便移动。

变压器室大小，依变压器外形大小而定，一般四周留有 1~1.5m 的人行通道、检修空间。使运行维护人员能看到变压器油位计和温度计的数字。变压器室除有特殊要求外，不宜建造为密闭的房间，这样不利于变压器散热。一般为半敞开式。三面有墙，一面有栅栏门。

从安装工艺上讲，干式整流变压器比油浸变压器要简便得多，从占地面积、安全性和基建费上讲，干式也比油浸式的胜出一筹。因此，在当前情况下，电压在 10kV（环氧浇注 35kV）以下、容量在 2000kVA 以下整流变压器，选择干式是比较有利的，特别是必须在室内安装和防火阻燃要求较高的地方，如铁道牵引用、发电厂整流装置用，以及研究室、实验室用的整流装置。

### 10.2.2.3 变流柜的分类和设计

#### 1. 变流柜的分类

变流柜按功率大小,可分为大型变流柜和中小型变流柜。大型变流柜直流电压数百伏至上千伏,直流电流几千安到数万安;中小型变流柜直流电压从几十伏到几百伏(个别几十千伏,如静电除尘整流装置),电流从几百安到几千安不等。从功率器件的冷却方式上又可分为空气自冷柜、油浸自冷柜、风冷柜和水冷柜,形式多种多样。现分述如下:

##### (1) 空气自冷柜

空气自冷柜一般功率较小,如小功率直流调速柜、一般直流电源柜、电站蓄电池充放电用直流电源柜。电源变压器和电抗器通常布置在柜的下层,中间是快速熔断器、保护开关或接触器等电器部分,上方是变流器单元组件即功率器件部分,这样顺着电流的流通次序布置,既便于母线的联接,顺畅,同时也使得连接路径短,损耗小。

电路中的操作按钮,信号灯,调节旋钮,计量仪表通常都安装在变流柜的柜门上。计量仪表装在柜门的最上方,下方是信号灯,信号灯的下方是操作按钮、转换开关、调节旋钮等。其高度要与人体的身高、视线相适应,以方便操作,巡视、读数清晰可见。

电阻是发热组件,特别是阻容过电压吸收回路中的电阻,功率大发热厉害,应远离其他组件安装,一般放在柜体上方,以免灼热其他组件,或使电子组件周围空气温度升高,对其运行不利。

一般传感器回路的导线、触发回路的导线、调节控制回路的导线都是弱电线,其余导线多是强电线,它们应分开行走,互相远离,不要捆绑在一起,以防干扰,弱电线要用屏蔽线,且其金属护套要接地(机壳)。接线端子板布置在柜下方或柜的左、右两侧或柜体的边柱上,其高度、部位要方便接线。

##### (2) 风冷柜

当整流器件功率较大,靠自然冷却达不到要求时选用风冷柜,基本由功率组件、风机、风道、脉冲变压器、脉冲分配板,阻容吸收回路等单元构成。风机装在柜的顶部,功率组件装在风道内。触发单元通常装在柜的正前方,风道外侧,操作者能方便地调试变流柜和监视触发脉冲。

在风机转动时风道不得摇动,同时选用低噪声风机以免噪声大,影响工作环境的安静。风道内装有风速继电器,或在功率单元的散热器上装有温度继电器,以便风机发生故障停止运转时发出报警,促使运行人员处理。

风冷器件的布置,应注意器件层数不宜多,多了风阻大,器件冷却不均匀,层数多时应进行流阻核算和出口风速、风量测试。只有当风机的风压大于风道内障碍物(散热器、组装架、母线)造成的压力损失时,风冷效果才会得到发挥。

##### (3) 油浸自冷变流柜

油浸自冷柜这种形式,存在于低电压大电流型的变流装置和高电压小电流型的变流装置中。例如,电镀行业,由于电镀溶液有腐蚀性,为了防止腐蚀,把整流变压器、整流器和调节控制设备全部装在一个密闭的油箱内,箱盖上有电源的进线、控制线的接线插座等,箱盖上还有信号指示灯、计量表计,都按防腐设计来安装。

高电压、小电流型变流装置,如静电除尘用整流设备,是油浸自冷变流柜的一种,其直流输出电压高达 60kV、72kV,电流几百毫安到 1A 左右。通常变压器、电抗器放在一个油箱,整流器及其过压吸收单元放在另一个油箱;而调节控制继电器操作部分装在一个自冷柜内,通过外部连线,将其连接起来。

低电压、大电流型整流设备，也有变压器、整流器装在一个油箱里的，目的是使整流器与变压器间的连接线缩短，减少负荷时电路损耗，提高整流效率节省运行费用。这种组合维修很不方便的，要求整流器要有足够的可靠性；同时结构设计上也要采取一些措施，如用膨胀式油箱，油箱上端留有大的空间，当油受热而膨胀时，有容纳地方；当故障产生时有压力释放器，以免油箱胀裂。

#### （4）水冷型变流柜

电化、电冶金用变流装置，直流电流多数在数万安，直流电压多数在数百伏，功率较大，因而多用水冷型交流柜，因为水的冷却效果比强迫空气冷却和油冷却的效果好得多。水冷型交流装置几乎都是交流功率柜与调节柜分别设立的。

功率柜主要由水冷整流器（功率组件）、快速熔断器、交-直流母线、水冷管道、触发脉冲板（晶闸管整流才有）、温度及压力传感器、计量仪表、器件故障巡检单元等构成。

一般交流母线垂直安装，按电源相序排列；直流母线水平排列；整流器件在交流母线上、下排列；再通过专用的冷却水套、压板固定在母线上，并联的各个整流器件再单独串联一只快速熔断器；快速熔断器的另一端与水冷母线相接。这样多个并联支路组成了一个单相整流臂，多个单相整流臂可组成三相整流桥，或六相半波整流。

柜的下方装有输送冷却水的进/出水管，其材料一般选用不锈钢。水管上有多个并联的送水支路，对交流母线、直流母线、快熔母线、功率单元分别供水和回收冷却水。冷却水管上设有水温、水压传感器和相应的指示仪表（或远控信号接点）监视冷却水温、水压；失常时报警。为了整流器之间的相互绝缘（不同相间）和被冷却器件的均匀冷却，以及减少流阻，增大水的流量，当整流器件很多时，水冷整流柜宜选择多个冷却支路，在规定的工况条件下（水压、水流量）选定冷却器，以获取最好的冷却效果。

整流柜上还装有其他保护装置，如故障巡回检测单元监视整流器的温度、快熔的工作状态、水温、水压等。这些单元（或仪器）的安装，一方面方便人们的巡视，另一方面又要远离强磁场部位避免干扰和影响测量精度。它们的输入、输出线的布置应靠近柜边框行走，同样远离动力母线，一般常用屏蔽导线，并集中接到对外端子排上。

#### 2. 柜体设计

柜体设计的依据为电气原理图、选用的器件、冷却方式、交直流进出线方式、安装位置要求、技术经济指标等。要保证一定的结构刚度和强度，承受装置内的变压器、母线、器件及散热器等的重量，同时，还要避免柜体产生共振，以免在使用和运输过程中变形或损坏。

尽可能采用标准化、系列化和组装结构增加柜体的通用性，以适用于多种装置。同时为了减轻重量，构件要尽量采用弯板结构件，少用型材。大功率装置的柜体要采取隔磁措施，以免在使用中柜体因涡流发热。因柜体是设备的外表，设计时要注意它的外观，兼顾散热和便于维修。在生产中，当条件许可时宜采用专业化生产设备，如数控冲床、剪床和弯板机，这样既可保护产品质量又可提高劳动生产率。



# 第 11 章 电子设备防干扰管理和认证

## 11.1 电子设备防干扰预测和管理

### 11.1.1 电子设备防干扰预测技术

#### 11.1.1.1 防干扰预测的发展和作用

从总体上看,电子设备防干扰必须采取技术和组织两方面的措施。所谓技术措施,是指系统工程方法、电路技术方法、设计和工艺方法等的总和。其目的是改善电子设备的性能。采用这些方法是为了降低干扰源产生的干扰电平,增加干扰在传播途径上的衰减,降低敏感设备对干扰的敏感性(或提高抗扰度)等。所谓组织措施,是指对各设备和系统进行合理的频谱分配、选择设备或系统分布的空间位置,以及制定和采用某些限制规章等的总和。其目的在于整顿电子、电气设备的工作,以便消除非有意干扰。

##### 1. 三种防干扰的方法

就技术原理而言,在现代电子技术发展过程中先后出现了三种实施防干扰的方法,简述如下:

(1) 问题解决法 这种方法是先进行研制,然后根据研制成的设备和系统在联试中出现的电磁干扰问题,运用各种抑制干扰的技术去逐个解决。这是一种落后而冒险的方法。因为系统已经装配好,再去“解决”电磁干扰问题是很困难的。为了解决问题,可能要进行大量的拆卸和修改,也许还要重新设计。对于大规模集成电路,可能要严重地损坏其版图,甚至要作大量返工。这不但造成人力和物力的浪费,延误系统研制周期,而且会使系统性能下降。

(2) 规范法 它是按颁布的防干扰标准和规范进行设备和系统的设计制造。这种方法可以在一定程度上预防电磁干扰问题的出现,比问题解决法更为合理。但由于标准和规范不可能是针对某个设备和系统制定的,因此,企图解决的问题不一定是真正存在的问题,只是为了适应规范而已。另外,规范是建立在防干扰实践经验之基础上的,没有进行电磁干扰的分析和预测,因而往往导致过量的预防储备,可能使系统成本增加。

(3) 系统法 此法是用计算机技术按预测程序针对某个特定系统的设计方案进行防干扰预测和分析。系统法从设计开始就预测和分析设备或系统的电磁兼容性,并在设备或系统设计、制造、组装和试验过程中不断对其电磁兼容性进行预测分析。若预测结果表明存在不兼容问题或存在太大的过量设计,则可修改设计后再进行预测,直至预测结果表明完全合理,才进行硬件生产。用这种方法进行系统设计和研制,基本上可以避免一般出现的电磁干扰问题或过量的防干扰设计。采用系统法是现代电子系统设计的总趋势。

##### 2. 费效比原则

电子设备防干扰设计的费效比综合平衡是设计的重要准则。根据美国贝尔实验室分析论证,在

新产品设计开始阶段把干扰抑制在电路组件级或分系统级,可消除电磁干扰的80%~90%。图11-1

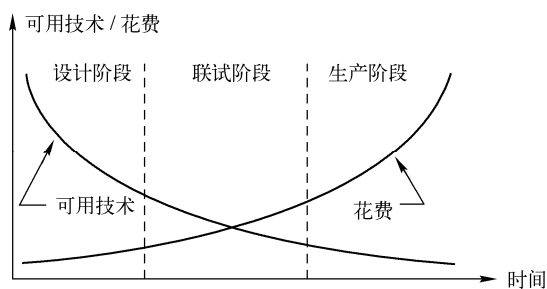


图 11-1 产品各个阶段防干扰措施数目与成本的关系

给出了产品从设计到投产的全过程中防干扰措施和成本的关系。在设计的起始阶段有很多控制措施使干扰得到抑制,同时花费的成本低。随着电子、电气设备研制工作的完成,可以利用的抗干扰措施的数目减少,而其成本反而增加。如果在产品试制成功后发现干扰,问题就显得困难多了,无论在技术上、体积质量上、投资的费用上都会成倍增加,使费效比上升,造成很大的浪费。

### 3. 实施电子设备防干扰在技术上需要经过的三大步骤

- (1) 系统的电磁干扰预测与分析。
- (2) 系统的防干扰设计。
- (3) 系统的防干扰试验,通过试验或测量予以验证。

电子设备防干扰预测是一种通过理论计算对用电设备或系统的电磁兼容程度进行分析评估的方法,通常应用在系统或设备研制的方案设计阶段和工程研制阶段。电子设备防干扰预测的目的是为了分析不兼容的薄弱环节,评价系统或设备兼容的安全裕度;为方案修改、防护设计提供依据。在研制、定型之前通过预先测知发现干扰问题,采取抑制和防护干扰措施,可以收到事半功倍的效果,因此,电子设备防干扰预测技术是一项具有很高经济效益的工程技术方法。

当系统和设备的功能设计方案初步形成之后,即可根据防干扰要求和指标,对方案开展防干扰预测分析,进行电磁耦合仿真计算,分析可能存在的干扰源和敏感设备的电磁敏感度,计算干扰程度,发现不兼容问题,并在此基础上进行防干扰检验和防护设计。随着研制工程的进展、研究的深入、数据的不断获取和积累,需要反复分析预测。原来在图纸上的设备或组件,随着调试、试验和原理样机的产生,需要用实验数据代替理论数据来重新对系统进行分析评估。因而预测分析的应用是伴随着防干扰设计开展的,贯穿于系统研制的全过程。

20 世纪 60 年代末期电子设备防干扰预测技术在美国首先开展研究,70 年代得到迅速发展;当时,在预测数学模型的研究、应用软件的开发、航空航天工程应用的实践等方面十分活跃。到 20 世纪 80 年代在航空航天领域的应用已相当普遍,据资料介绍,预测软件 IEMCAP 曾应用于 S-3A、F-15、LyTS-111、F-18、F-14、F-16、A-10、A-70、F-111、F-105、RF-40、F-4、B-52、EC-135、SS、OV-10 等 18 种飞机和航天器。到 90 年代,美国不断发展各种专门化的预测分析软件,针对性和专业性更强。例如波音公司研制的飞机机载雷达天线产生的电场分布计算软件,专门用来预测雷达天线产生的电场对机载设备工作的影响。

20 世纪 80 年代初,前苏联也开始研究开发电子设备防干扰预测分析软件并很快付诸工程应用。德国、英国和法国都先后开展了预测技术的研究和应用。20 世纪 90 年代以来我国也逐步开展研究。

### 4. 防干扰预测分析的主要作用

(1) 在已知设备电气特性(如干扰源特性、敏感器特性)参数的情况下,预测和分析系统内部所有设备的电磁兼容性和安全性(安全系数)。在应用电子设备防干扰预测软件时,设备的电气特性可以根据设计、调试、试验和使用的不同阶段由以下方法获得。

- 根据设计数据得到。

- 可以使用相类似产品的数据代替。
- 可以根据经验和资料给出。
- 由实验测量数据给出。
- 由规范和标准的数据获得。
- 按照不同的研制阶段,取得所需要的数据,即可在不同阶段进行分析计算。

(2) 当修改某个设备的传输性能参数(如工作频段或安放方位或信号电缆走向)时,分析比较电磁干扰的变化。

(3) 对各种防护设计的评估计算。

(4) 制定干扰极限和敏感度规范。例如,通过设备已知的敏感度值确定其允许所受干扰的极限范围,或者通过计算已知的各种电磁干扰的综合作用,确定设备应该具有的敏感度极限,从而为设备的设计制订出指标。

#### 11.1.1.2 防干扰预测的思路和分类

(1) 防干扰预测的特点

电子设备防干扰预测的重要特点是涉及对象广:从家电、工业电气设备、电子设备到舰船、航空航天用电设备等;信号频率范围大:从直流到几十个吉赫兹;计算对象几何尺寸差异大:从微电子应用到飞机、大型舰船,乃至空间大气层等。

以上特点决定了进行电子设备防干扰预测算法的多样性、广泛性。

(2) 防干扰预测的途径

① 与已有系统进行类比分析。该方法必须有类似的系统,且往往忽略了许多因素,导致精度很低。

② 采用缩小模型。该方法应用范围很窄,主要是通信天线系统布局方面,其最大缺点是消耗大量人力、财力,且影响研制周期。

③ 基于对象模型,采用计算机实现预测。电磁干扰预测是系统法设计的核心,EMI 预测在系统内和系统间分别实施,目前,国外已有作为商品出售的各种计算机分析预测程序。

(3) 对系统进行电磁干扰预测的基本思想

① 分析设计好系统内的主要干扰源、耦合通道和敏感体,并分别建立起数学模型。

② 选择一个敏感体。

③ 选择一个干扰源。

④ 确定这个干扰源通过所有耦合途径传输到敏感体的能量。

⑤ 对每个干扰源重复第①步。

⑥ 对每个敏感体重复第③、④、⑤步。

⑦ 对输入全部数据进行计算。

⑧ 系统总体设计人员根据计算结果对有关部位进行方案修改,并重新进行分析预测,直至找出最佳的设计方案。

有了这个基本思想,就可以拟定电子设备防干扰分析预测方案及计算机程序流程方框图。实现这个基本思想的重要基础是建立数学模型。

(4) 防干扰预测的分类

电子设备防干扰预测可从不同的角度得到相应的分类方法。

① 按预测对象,可分为印制级预测、部件级预测、分机级预测及系统级预测。

② 从预测所用方法上可分为经验法、解析法、数值法；或分为场的方法、路的方法、场路结合的方法等。

### 11.1.1.3 电子设备防干扰预测的数学方法

由于电子设备防干扰预测对象的多样性，决定了其计算方法的多样性。可以说，计算电磁学的所有方法，从低频到高频和微波，从解析到数值法，都在电子设备防干扰预测中得到应用；而且，由于实际问题的复杂性，往往还必须结合电路算法才能获得最终的预测结果，以下就场的主要算法原理、应用领域予以介绍。

场的方法是以分布的观点来观察求解的问题域，其出发点是 Maxwell 方程组，求解时必须根据边界条件来确定解答，这称为边界值问题；电磁场的边值问题求解归纳起来有三种方法，即第一种称为严格解析法或简称解析法；第二种是数字法也称数值法；第三种是近似解析法或简称近似法。

#### 1. 解析法

解析法包括严格建立和求解偏微分方程或积分方程。对偏微分方程的严格求解的经典方法是分离变量法；对积分方程的严格求解方法主要是变换数学法。解析法的优点是可将解答表示为已知参数的函数，从而计算出精确的结果。这个精确的解答还可以作为近似法和数值法解答的检验标准。在解析过程中以及解的函数式中，可以观察到问题的内在联系和各参数对结果所起的作用；但是解析法存在严重的缺点，主要是它仅能用于解决很少量的问题。事实上只有在参数不多的坐标系中能分离变量，而用积分法时往往又求不出结果，致使分析过程既困难又复杂。

分离变量法是求解二阶线性偏微分方程定解问题的经典方法之一。它获得了广泛的应用，同时也受到一些因素的限制。必须指出，只有在少数问题中才能得到偏微分方程或积分方程的严格解，所以近似解析法变得十分重要，即使有严格解的问题也很少用解析法，而用近似法来求解往往会感到便利。

#### 2. 数值法

数值法又可分为纯数值法和解析数值法。数值法可用于求解第一类和第二类方法可以解决的问题，也可以用作求解由于边界复杂而不能解决的一些问题。在纯数值法中，通常用差分代替微分，用有限求和代替积分（即数字积分），这样，就将问题化为求解差分方程或代数方程组问题。这时，为了求得较准确的数值答案，计算工作量很大。为了减轻计算工作量，有时宁可增加一些解析部分。这种方法称为解析数值法。显然，数值解也是一种近似解。

数值法包含着一个离散化的问题，因为无论在微分方程还是积分方程中，微分或积分所作用的函数都是连续函数，而电子计算机所能处理的函数则是离散函数。数值方法所做的工作是将微分方程化为差分方程，或将积分方程中的积分化为有限求和，从而建立代数方程组，因此它的主要工作量是用电子计算机求解代数方程组。数值法的优点是它能解决许多第一类和第二类方法不能解决的问题，且可得到所需要的精确答案。它的缺点是所求得的答案正确与否需用实验或其他可靠的结果来证明。原则上，数值法可以求解具有任何复杂几何形状的电磁场边值问题。

数值法应用于电磁场领域虽然才短短几十年，但是随着高速计算机的出现，工程电磁场问题的理论研究和分析方法，取得了前所未有的突破性进展和获得了大量的有实用价值的结果。各种数值计算方法应运而生，并相继应用到各类电磁场问题之中。例如，有限元法、有限差分法、矩量法、格林函数法、边界元素法、几何绕射理论、奇点展开法、变分法等。要全面和系统地介绍这些方法是比较困难的，下面仅介绍其中几个有代表性的数值方法。

### (1) 有限差分法

有限差分法, 简称差分法, 其核心思想是以差分代替微分, 即从微分方程出发, 利用差分原理把微分方程转化为差分方程组, 实现连续电磁场域的离散化求解。这种方法早在 19 世纪末已经提出, 但把差分法和近似数值分析联系起来, 则是在 20 世纪 50 年代中叶以后的一段时间。它以简单、直观的特点而得到广泛的应用, 无论是常微分方程还是偏微分方程, 各种类型的二阶线性方程, 以至高阶或非线性方程, 均可利用差分法转化为代数方程组, 而后用电子计算机求其数值解。有限差分法是以差分原理为基础的一种数值方法, 它把电磁场连续场域内的问题变为离散系统的问题, 即用各离散点上的数值解来逼近连续场域内的真实解, 因而它是一种近似的计算方法, 根据目前计算机的容量和速度, 可以得到足够高的计算精度。

目前, 有限差分法已在微波、电磁散射、雷达等领域得到广泛应用。其最大优点就是成熟可靠, 程序的模块性强; 不足之处在于处理几何形状复杂、变化剧烈的场域时有一定的工程难度。

### (2) 有限单元法 (FEM)

有限单元法, 简称有限元法, 是以变分原理和剖分插值为基础的一种数值计算方法。在早期, 有限元法以变分原理为基础, 所以, 它广泛应用于拉普拉斯方程和泊松方程所描述的各类物理场。此后证明, 有限元法可用于任何微分方程所描述的各类物理量, 同样适用于时变场、非线性场以及分层介质中的电磁场求解。

有限元法的基本思路是通过与边值问题对应的泛函得出等价的变分问题 (即泛函的极值问题), 把连续的求解域离散成剖分单元之和, 对泛函求极值, 得出有限元矩阵方程, 求解后得出整个问题域中的电磁场分布状况。

目前根据对边值问题的积分转化方法的不同可分为变分有限元法和伽辽金 (Galerkin) 有限元法, 两者在加权余数法的基础上是统一的。有限元法的优点是适用于具有复杂边界形状或边界条件、含有复杂媒质的定解问题。虽然这种方法的计算程序一般较复杂、冗长, 但其各环节易于标准化, 可得到通用的计算程序, 而且有较高的计算精度。

由于其灵活的场域适应能力, 有限元法已被广泛应用于多个领域, 成为工程计算中一种重要的数值算法。但是有限元法也存在不少问题。人们不断寻求和发展其他数值方法, 其中与有限元法这种区域性解法相对应的就是边界元素法。由于它在一般场合下能替代有限元法, 有时它又比有限元法更加有效、准确, 因而受到人们的普遍重视, 得到日益广泛的应用。

### (3) 边界元素法

边界元素法, 简称边界元法。它仿照有限元法, 在边界法中引入边界元素的概念, 发展成为一种边界元法。所谓边界元就是把区域的边界分割成许多单元, 在各单元上所考察的插值函数, 如同有限元的插值函数那样, 可以具有各种形式。因为以前的积分方程近似解法是把状态量集中到区域表面的许多点上, 而此法没有这个限制。

边界元法是把边界积分法与有限元法的离散方式组合起来的产物。这里积分方程的建立不像经典的边界积分法那样采用格林函数, 而是用加权余量法。因此, 边界元法是将描述场的微分方程通过加权余量法归结为边界上的积分方程, 然后把这个积分方程进行边界分割和插值, 从而求出近似解的数值解法。采用加权余量法, 使得求解变得更为有效和更加简练, 用加权余量法所形成的积分方程则是更一般的方法。

由于边界元法是在经典边界积分方程法和有限元法的基础上产生的, 因而它兼有这两种方法的优点。边界元法移植到电磁场领域是 20 世纪 80 年代的事, 现在正蓬勃发展, 并深入到各个领域中去。

#### (4) 矩量法

矩量法, 又称广义伽辽金法, 是一种把连续方程离散化, 使之成为代数方程组的方法。此法对于求解微分方程和积分方程均适用, 但更多用于求解积分方程。矩量法, 其求解步骤是先将需要求解的偏微分方程或积分方程写成带有微分或积分算符的符号方程, 再将待求函数表示为某一组选用的基函数的线性组合并代入符号方程, 最后用一组选定的权函数对所得的方程取矩量, 就得到一个矩阵方程或代数方程组。剩下的问题就是利用计算机进行大量的数字计算, 包括矩阵的反演(求逆矩阵)和数字积分等。用此法可以达到所需要的精确度。

矩量法的关键在于从基于加权余数法实现积分计算到有限项和式的变化, 其中, 基函数、权函数的选择是关键。这种方法中的解析部分很简单, 但其计算工作量很大, 即使用近代高速大容量计算机, 计算任务也很繁重。重要的是矩量法能够解决第一类和第二类方法所不能解决的边界比较复杂的一些问题, 因而此法得到了比较广泛的应用, 特别是在天线分析和电磁场散射问题中更有广泛应用的前景。

#### (5) 奇点展开法

奇点展开法可以描述天线及散射体的暂态特性, 它用复频率平面内的奇点来描述电磁响应。

综上所述, 各种数值分析方法的优缺点是相对的, 哪一种方法也不可能是十全十美的, 只能是比较适用于某种特定的情况。近年来, 边界元法与有限元法相结合的方法、矩量法与几何绕射理论相结合的方法、格林函数法与矩量法相结合的方法以及奇点展开法与变分法相结合的方法等相继提出, 充分显示了它们之间取长补短的功效, 这种研究方法可以称之为混合法。混合法也许是今后若干新分支的萌芽, 蕴藏着无比的生命力, 应该引起电子设备防干扰工程师们的重视。

#### 3. 近似法

在数理方法中主要的近似法有逐步逼近法、微扰法、变分法和迭代变分法等。近似法也是一种解析法, 但不是严格解析法。它所得的结果一般都表示为级数。用这些方法可以求解一些用严格法不能解决的问题, 用起来比较简便。

前面介绍的几种算法——有限差分法、有限元法、矩量法, 其共同特点都是基于场域剖分, 具有较好的场域适应性, 目前已成为电磁计算的主流方法。这些算法对于求解场域尺寸不超过几个到十几个波长的问題一般都可得到满意的结果, 故也把这类算法统称为低频算法。对于电尺寸很大的场域求解, 由于计算量和存储资源要求太高, 则必须借助高频算法, 其中最具有代表性的是几何光学法、物理光学法、几何绕射法(简称 GTD)及由此发展、完善的一致性绕射理论等。这些方法既简单易算, 又能应用计算机求得电磁场的散射、绕射等问题比较精确的解。

长期以来, 经典的高频近似方法——几何光学法和物理光学法都有很大的局限性。首先, 这两种方法的应用条件是波长趋于零, 即散射体尺寸远大于波长时才精确。当具有小曲率的散射体的边缘、拐角、尖端或阴影区变得不可忽视时, 上述两种方法便失效。其次, 上述的绕射积分通常很复杂。在许多场合往往很难计算。当散射体形状复杂时, 很难求得精确的结果。

为了弥补上述两种近似方法的不足, 20 世纪 50 年代初, J. B. Keller 在几何光学的基础上提出绕射射线, 奠定了几何绕射法的算法基础, 后又经其他研究人员的进一步完善, 使其解决问题的广度得到极大拓展。目前已广泛应用于电磁辐射和散射的各个方面, 成为高频领域的一种重要的近似算法。

几何光学只研究直射、反射和折射问题, 不能解释绕射现象, 其结果是不能计算阴影区的场。Keller 提出的绕射射线弥补了这一不足, 其基本原理可归结为以下三个方面。

(1) 绕射射线轨迹遵循广义的费马(Fermat)原理, 而绕射场是沿绕射射线传播的 原始的

费马原理认为：几何光学射线沿从源点到场点的最短路径传播，广义的费马原理则把绕射射线也包括在内，认为绕射射线也是沿最短路径传播的。

(2) 绕射场传播满足局部性原理，即绕射只取决于绕射点邻域的物理特性和几何特性。众所周知，在反射点周围的第一菲涅耳 (Fresnel) 区的性质对反射场的结构起主要作用。推而广之，绕射场也只取决于入射场和散射体表面的局部性质。

局部性原理的作用在于可以针对某种几何形状的散射体，导出其绕射系数，从而把入射场和绕射场联系起来。这些是进行绕射计算的基础，称为典型问题。事实上，几何绕射理论所能解决的问题范围取决于已知的典型问题的数量。

(3) 离开绕射点后的绕射射线仍遵循几何光学定律，即沿直线传播，在绕射射线管内能量守恒，而沿射线路径的相位延迟就等于媒质的波数和距离的乘积。所谓的绕射点，是指在界面上入射的几何光学场不连续的点，如在光滑曲面、物体的边缘和尖顶上与入射线相切的点，分别对应表面绕射射线、边缘绕射射线和尖顶绕射射线。

在均匀媒质中几何光学射线遇到物体的不连续性时，一般会出现几种典型绕射现象，即边缘绕射、尖顶绕射、曲面绕射，如图 11-2 所示。

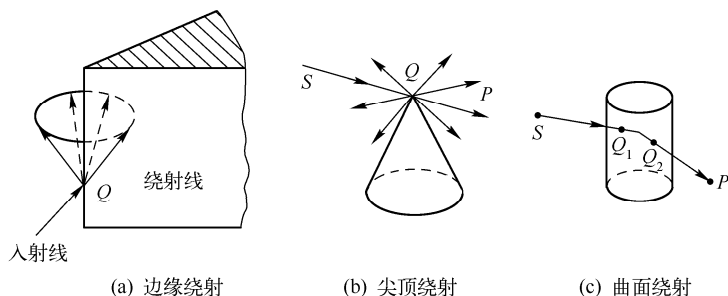


图 11-2 典型绕射现象

在边缘绕射时，边缘绕射线与边缘夹角等于相应的入射线与边缘夹角，一条入射线将激起无穷多条绕射线，它们都位于一个以绕射点  $Q$  为顶点的圆锥面上，如图 11-2 (a) 所示。在尖顶绕射时，其绕射线是从源点  $S$  经尖顶到达场点  $P$  的射线。由尖顶发出的绕射线可以是任意方向的，绕射线波阵面是以尖顶为中心的球面，如图 11-2 (b) 所示。

在曲面绕射情况下，表面射线 (或称爬行射线) 在传播时，将不断地沿其切线方向发出绕射线。由广义费马原理可知，入射线和绕射线应分别与表面上  $Q_1$  和  $Q_2$  点相切，而表面射线是沿  $Q_1$  和  $Q_2$  点的最短路径传播的，如图 11-2 (c) 所示。

通过上面简要的介绍可知，将 GTD 应用于工程计算，原理上是不难的。由于辐射和散射问题的高频近似解就是直射、反射和绕射射线对场的总贡献，因此，首先要找出对给定场点的场有贡献的所有射线及其轨迹，即用费马原理确定反射点和绕射点，并求出源点经反射点或绕射点的极值路径，这一过程称为射线寻迹。如果参与反射线和绕射过程的物体几何形状很简单，则射线寻迹也较简单；但如果物体几何形状复杂，则寻迹问题就很复杂。复杂的射线寻迹方程往往不能用解析方法严格求解，只能用数值计算方法求解。另一个复杂问题是遮挡问题，即物体的一部分挡住了来自物体其他部分的反射和绕射。不过，借助于计算机，采用适当的计算方法，上述射线寻迹和遮挡问题总是可以求解的，找出了到达场点反射线和绕射线后，即可通过叠加方法求出场点处的总场。

到目前为止，GTD 仅仅以两个典型问题为基础，其一是平面波在理想导电劈上的绕射；其二

是平面波在理想导电圆柱上的绕射。至于其他问题,还没有现成的严格解可利用,这是 GTD 的应用范围尚属有限的一个主要原因。

GTD 的另一困难是它的算式不能用于计算散焦区的场,这是射线光学的固有缺点。如果物体结构复杂,则有待确定的绕射线数量大,确定绕射点和绕射轨迹的难度高,因而计算量会增加。尽管 GTD 目前还不十分完善,但由于它物理概念清晰、简单易算,特别是当频率提高时,其计算精度也相应提高,这是一个可贵的特性,近来已广泛用于求解许多天线的辐射场和许多形状复杂物体的散射场,还广泛应用于计算各种目标的雷达散射截面积。

#### 11.1.1.4 电子设备防干扰预测的数学模型

干扰预测模型包含源模型、传输耦合模型、敏感体模型,建立系统的干扰预测模型,应当以需求为基础,考虑实用性和可行性,并应考虑便于计算机程序处理。程序通常要求模型反映出系统中最主要的一阶干扰效应。只有在特殊的工程要求中,才考虑高阶的干扰效应。下面将讨论建模方法、干扰预测方程模型、源模型、耦合模型和接受器(敏感体)模型的建立要点。

##### 1. 建模方法

从电磁理论的角度看,建立干扰源及干扰传输与耦合的数学模型就是求解电磁场的麦克斯韦方程。严格地说,如果考虑到场源的结构、媒质的形状分布和性质等各项因素,求解麦克斯韦方程是极其困难的。一般都将整个问题分成几个独立的问题分别进行处理,同时加以理想化,即假设某些理想条件使具体问题得到简化和近似,以便于数学表达和处理。根据具体问题的不同,求解的方法也有所差异。

建模方法一般有两种,即函数描述法和函数拟合法。有一些模型是可以用函数来描述的,或通过实测来描述,例如,将实测天线方向图拟合出天线增益关于方向角度的经验公式,而后将理论公式或经验公式编入程序,运算时只需将相对角度代入公式即可得到方向增益。这种方法的优点是精度高,但通用性差,每增加一种新型天线都必须修改源程序。当天线种类增加到一定数量后,由于判断语句过多,严重降低运算速度。

发射机通带特性曲线、接收机通带特性曲线及天线方向性曲线等都可以用折线拟合法近似处理。仍以天线方向性为例,它是一组天线增益数据及各增益点对应角度值来模拟天线的方向性图。计算时利用相对角度值在折线模型上进行插值运算。折线模拟的精度取决于取样点数,但取样点数的多少应适可而止,点数太少,精度不够,点数太多,运算速度下降。

对待建立模型的选择,由分析其目的、其精度要求、原始详细数据及可靠性等来确定。最简单的模型,要求用较少的时间和需要在较小范围的初始信息的分析,但是有最小的可靠性。采用简单模型法对于获得初步估价最合适,它提供了事物变化的趋势。较完善的模型,要求较详细的初步信息,这明显要复杂得多,但准确性和可靠性也更高。

##### 2. 干扰源模型

干扰源模型从广义来说,又可以称为发射器模型。但若从传输特性来划分源模型,又可分为传导源模型和辐射源模型两类。传导源模型通常用电压源和电流源模型表示;辐射源模型通常用功率或场强(电场强度和磁场强度)来表示。通常,干扰源模型按照实际预测分析的需要,分为以下三类。

##### (1) 有意辐射干扰源模型

有意辐射干扰源模型被用来描述各种发射天线发射的电磁波,一般由发射机的基本调制包络特性表示主通道模型;用它的谐波调制包络特性和非谐波辐射特性来表示谐波干扰模型和乱真干



扰模型。

### (2) 无意辐射干扰源模型

无意辐射干扰源模型被用来描述各种高频电路、数字开关电路、电感性瞬变电路所引起的电磁辐射干扰,工程中通常把辐射源简化为电偶极子或磁偶极子的模型,把辐射的电磁波描述为正弦电磁波和指数脉冲波、指数振荡衰减波等。各种孔缝泄漏辐射干扰也属无意辐射源,要详细描述这种泄漏场是复杂而困难的,通常用衍射理论或电磁互补原理分析的简化模型来表示。

辐射干扰模型常用电场强度、磁场强度和功率密度等物理量表征其量值。

### (3) 传导干扰模型

在电路中的传导干扰与辐射干扰的性质是不同的,传导干扰往往用电压和电流的频谱函数表示,其波形常用稳态周期函数和瞬态非周期函数以及随机噪声来描述。

不论是辐射干扰模型还是传导干扰模型,就其信号特征来说以时域表示较为直观,因此,可将干扰源时域波形概括为单频连续波、脉冲序列波、斜波、阶跃波、梯形单脉冲波、双指数脉冲波、调制波(调幅、调频、开关键控、频移键控)、数字调制波、随机噪声波。其中,以连续干扰源和脉冲(或脉冲串)干扰源最具典型意义。工业加温、高频感应电炉、高频医疗设备、接收机本振等,都可认为产生连续干扰的干扰源,它们的特点是比较有规律的高频振荡,造成的干扰近似谐波干扰,其频带较窄。

脉冲干扰源(单脉冲或脉冲串),如点火系统、点火电路中流动的脉冲电流和瞬变过程等,都会造成强大的干扰,它们的特点是频带较宽。

描述干扰源参数可以是干扰的时域特性,也可以是干扰的频域特性。但是,当所要建立的源模型是一个随机源时,由于随机信号的时域值是很难预测的,所以,在这种情况下必须用频域参数去表征。用时域特性描述的源模型称为时域模型,频域特性描述的源模型称为频域模型。显然,频域模型可以更精确地描述干扰的发射频谱。因此,建立发射源的频谱特性用以表示源的全部重要特征是非常重要的。

### 3. 传输耦合模型

传输耦合模型主要是传导型耦合模型和辐射型(空间传输)耦合模型。当然它们不是绝对的可划分,因为有时两者交错在一起,归纳起来,电磁工程中较为实用的传输耦合数学模型主要有相距很近的两导线间电容耦合模型、相距很近的两导线间电感耦合模型、通过公共阻抗的电路耦合模型、电磁场-导线的耦合模型、天线-天线的耦合模型、机壳-机壳的耦合模型、滤波特性模型、自由空间传输损耗模型、地形地物影响传输损耗模型。

### 4. 敏感器模型

在实际电子设备防干扰预测工程中,最为常见的敏感器有两类:一类是以接收无线电波为主要功能的接收机;另一类是由模拟、数字电路组成的电子设备。这两类设备最容易受到干扰。因此,从实际情况出发,防干扰预测的敏感器模型主要是这两类。

#### (1) 接收机敏感模型

接收机敏感模型,是对各种接收天线对辐射干扰响应特性的描述。通常用接收机的频率选择性曲线来表示它的同频道响应,用中频选择性的分段线性化曲线来表示非线性效应,包括乱真响应以及交调、互调谐波响应。对于噪声干扰的响应则用噪声功率公式作为噪声敏感模型。

#### (2) 模拟、数字电路敏感模型

无论是电路中的传导干扰直接作用于模拟、数字电路的响应,还是辐射干扰经过导体感应进入电路的间接作用的响应,模拟、数字电路的响应都用敏感度来描述,因而称为敏感度模型。在

电磁干扰耦合的预测模型中, 模拟电路或数字电路网络经常用一个等效阻抗来代替, 如将感应导线的两端负载等效为两个阻抗, 实际上可能是两个设备或两个电路网络。分析敏感器对电磁干扰作用的响应时, 通常不考虑相位的影响。一般情况下只计算一阶响应, 不考虑高阶效应。

随着电子电路计算机辅助分析方法的发展, 预测分析的数学模型已能够对模拟或数字电路的实际网络结构应用几何拓扑原理进行描述, 可以分析计算到电路的每个元器件上的干扰电压和电流值, 使敏感器电路模型延伸到设备和电路的元件级水平。

### 11.1.1.5 电子设备防干扰预测的实施步骤

一般认为电磁干扰具有复杂性、隐蔽性和随机性, 比较难以分析, 因而形成了电磁干扰预测无从下手的看法。其实电磁干扰也是有其规律的, 尽管影响因素多、电磁场分布描述困难、计算工作量繁杂, 但只要将复杂系统分层次、按步骤地分解, 就能由大到小、由繁到简地进行计算。所谓层次, 是指系统级—分系统级—设备级—部件级—元件级五层; 步骤, 是指干扰源和敏感器一对一地逐个分析。因此, 对一个系统的预测工作, 首先必须制定一个划分层次、划分分系统的方案, 然后逐层展开, 逐项进行, 这样就可以有条不紊地深入进行电磁干扰预测。

#### 1. 系统级预测分析步骤

系统级预测又分为系统间的预测和系统内的预测两类。系统间的电磁干扰, 其主要耦合途径是天线对天线的耦合, 例如舰载飞机与舰船的干扰分析就属系统间的干扰预测。

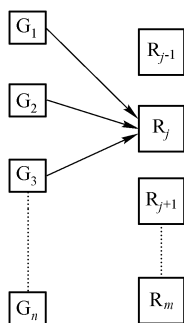


图 11-3 干扰源对敏感器的逐个分析

首先要分析各系统有几个干扰源、几个敏感器, 如图 11-3 所示, 分析计算步骤如下:

- (1) 选择一个敏感器  $R_j$ 。
- (2) 选择一个干扰源  $G_1$ 。
- (3) 分析确定  $G_1$  对  $R_j$  可能存在的所有耦合途径。
- (4) 对所有耦合途径逐个分析计算  $G_1$  传输到  $R_j$  的干扰量。
- (5) 对所有的干扰源  $G_2, G_3 \cdots G_n$  分别重复步骤 (3)、(4)。

(6) 对敏感器  $R_j$  接收到的所有电磁干扰量进行综合处理, 判断敏感器在此环境中是否兼容, 并确定对敏感器  $R_j$  干扰起决定作用的主要干扰源。

系统内的预测分析, 除了需要考虑天线对天线的辐射耦合以外, 还需要考虑线间耦合、天线对线缆间的耦合、共阻抗耦合、机壳泄漏的影响等等。因此, 系统内预测由于内部设备相互联系紧密, 空间布局密集, 既需要按层次分解, 划分分系统级、设备级、组件级, 同时又要考虑到分系统和设备相互间的交链频繁, 存在难以分解的局部情况, 如线缆间的耦合, 既有同层次的横向连接, 又有上下层的纵向连接, 这就需要把它划分成一个专门子系统来分析计算。因此, 对系统内的预测需要把划分层次和划分专门子系统相结合, 同时予以综合考虑。

#### 2. 设备级预测分析步骤

设备级预测分析主要以两个设备之间的耦合分析为基本内容, 对于多个设备, 只不过对所有设备依次循环一一对应重复进行而已。图 11-4 是两个设备之间干扰分析的示意图, 分析步骤如下:

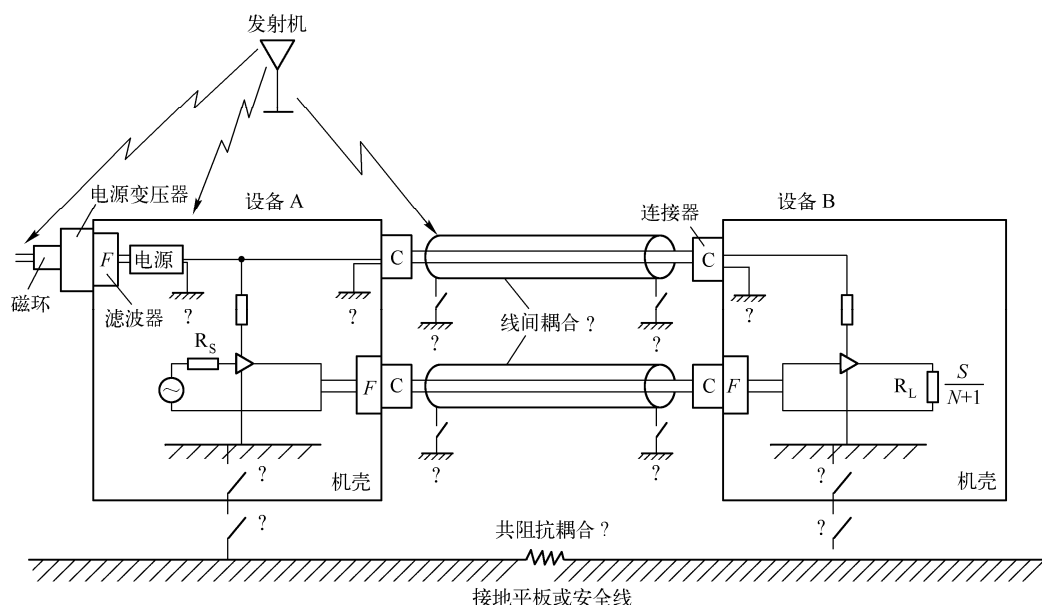


图 11-4 两个设备之间干扰分析示意图

- (1) 首先分析两个设备所在空间的电磁环境，有无外来电磁辐射干扰。
- (2) 其次分析两个设备的相互联系；有无互相连接的电缆；有无共用电源；有无公共接地平面；是否通过箱壳接地构成接地环路。
- (3) 分析设备内部电路辐射源、传导干扰源和敏感电路，并以“端口”形式表示两个设备的所有干扰源和敏感器。
- (4) 确定两设备之间的所有电磁干扰耦合途径，如导线对导线的耦合、公共阻抗耦合、共电源阻抗耦合、天线对天线的耦合、天线对导线的射频耦合、近场共模感应耦合、差模感应耦合，等等。
- (5) 逐项一对地分析，既要考虑多“端口”的综合效应，更要抓住主要的严重的干扰源端口，判断兼容与否。

## 11.1.2 电子设备防干扰管理的内容

为使系统或设备具有良好的电磁兼容性，还应对其全寿命期间的各个阶段实施防干扰管理。全寿命期一般包括论证阶段、方案阶段、工程研制阶段、定型阶段、生产和使用阶段。各阶段防干扰管理的内容如下：

### 11.1.2.1 论证阶段

- (1) 分析预期的电磁环境，确定电磁环境电平。
- (2) 提出在预期的电磁环境中的防干扰技术指标要求；将防干扰设计纳入到系统功能设计中去。
- (3) 分析电磁环境效应。
- (4) 分析费用和 risk，研究频谱利用问题。

### 11.1.2.2 方案阶段

- (1) 成立电子设备防干扰技术组，这是加强防干扰管理的有效措施之一。由各方面代表组成

的专家咨询小组，为工程管理的决策、评审、分析和研究提供技术咨询，由主研制单位负责组织。

(2) 制定电子设备防干扰大纲，它是研制期间最高级的防干扰管理文件。它说明为达到所提出的防干扰技术指标要求而采用的总体途径、规划和设计准则，并说明防干扰管理的组织和职责、技术要求等。

(3) 选用和剪裁适用的标准，即对标准中的各项要求进行分析和选择，必要时进行修改、删减或补充；剪裁是对执行通用标准和规范的经验总结，是为了在满足使用要求的前提下，满足最低的技术要求，以期达到最佳的效费比。

(4) 确定系统、分系统和设备的防干扰要求；拟定各分系统、设备及天线的最佳布置方案。

(5) 确定频谱要求，提交频率分配申请及有关资料，从系统总体上研究各频率的配置，进行初步的协调，减少以至消除造成干扰的可能性。

(6) 制定电子设备防干扰控制计划。它是比防干扰大纲更为具体的技术文件，目的在于说明如何实现防干扰指标的要求。内容包括：在管理方面，负责防干扰的部门或人员的职责，研制中各阶段的工作目标和进度以及评审要求等；在频谱保障方面应根据性能和防干扰指标要求划分成各分系统工作频段或频率进行统一选取和分配；在防电磁干扰结构设计方面，应说明所使用的材料及其结构衰减电磁发射和降低敏感度的程度，所使用的金属、涂层和附件，以及滤波形式及其特性、密封衬垫的特性、屏蔽及其设计方法、腐蚀控制措施等；在电子电气布线设计方面，应说明设计内容、电缆分隔和敷设以及接地原则；在防干扰电路设计方面应详细说明控制电磁发射或抗干扰的电路设计技术、方法，包括元器件和电路的选择、搭接和接地技术、滤波器选择、脉冲前后沿的选择、屏蔽隔离及去耦等；在标准、规范及验证要求方面，应说明所选用的标准与规范的名称、所进行的剪裁及其技术依据、防干扰指标要求及其验证计划；还应说明为满足防干扰指标要求所做的预测分析以及可能出现的风险。

(7) 确定验证要求和制定试验计划。这是为了确定电子设备防干扰的指标要求，并为防干扰设计提供依据。需要进行以下试验：总体设计防干扰试验，包括电磁环境分析试验、设备和分系统及无线最佳布置模拟试验、总体控制干扰措施试验；电磁发射和敏感度试验，这是依照标准和规范中规定的要求和方法进行的试验；安装检测试验，这是为了验证防干扰设计的效果，在系统安装完毕后，对防干扰控制效果和工艺质量进行验证和检验；总体防干扰鉴定试验，这是为了验证系统在各种工作状态下，设备与分系统之间，系统与环境之间的电磁兼容性而进行的试验。

### 11.1.2.3 工程研制阶段

(1) 实施电子设备防干扰控制计划，在功能设计的同时进行防干扰设计，防干扰设计是保证系统效能得以实现和充分发挥的重要手段。首先应分析并确定电磁环境电平，选用防干扰标准和规范，作为防干扰设计的依据；防干扰文件包括防干扰大纲、控制计划与试验计划等；确定敏感度门限和耦合电平、预测电磁易损性；确定防护要求，对于防护要求低于 30dB 的设备，一般不需要附加防护措施，设计将被提交批准；如果防护要求在 30~70dB 之间，则需附加防护措施；如果预测表明将出现电磁易损性，则应进行复审或重新设计，可以要求修改对预期环境的规定，或对系统效能重新进行说明。程序管理人员的审查是对整个设计进行审查、试验验证和对效费比进行评价，并最后批准设计；由程序管理人员组成的咨询委员会是作为考察、技术协商的机构。

(2) 进行模拟、试验，改进和完善设计，对设备、分系统和系统间的电磁兼容性进行考核试验，验证设计是否满足标准和规范，是否能在使用环境中满意地执行规定的任务。

(3) 综合分析总体电磁兼容性, 确定生产工艺和安装过程中如何保证电磁兼容性, 编制频率管理文件, 在使用维修文件中纳入防干扰问题。

#### 11.1.2.4 定型阶段

- (1) 进行总体电子设备防干扰鉴定试验, 确定是否满足防干扰指标要求。
- (2) 对频谱利用进行全面审核, 提出频率指配申请。
- (3) 审查电子设备防干扰有关文件的完备性, 提交防干扰综合评价报告。

#### 11.1.2.5 生产和使用阶段

(1) 严格执行工艺文件和安装要求, 保证电子设备防干扰的要求落实到生产的全过程, 并加强检验。

- (2) 制定并实施电子设备使用和维修人员培训计划, 以及频率管理和使用计划。
- (3) 将使用、维修中有关防干扰方面的资料、数据、经验、费用等存入数据库。

从以上分析可以看到, 电子设备防干扰管理要有全面的计划, 强调从工程研制之初、从防干扰管理的较高层次开始, 严格建立协调网络和工作程序, 以提高防干扰工作的有效性。

## 11.2 电子设备防干扰标准与认证

### 11.2.1 电子设备防干扰标准

标准是一个一般性的导则或预期要满足的准则。防干扰标准是产品进行防干扰设计的指导性文件, 是实现系统效能的重要保证。“积极采用国际标准和国外先进标准”是我国的一项重大经济技术政策, 是促进技术进步, 提高产品质量、扩大对外开放、加快与国际惯例接轨、发展社会主义市场经济的重要措施。《中华人民共和国标准化法》第二章第七条明确规定: “国家标准、行业标准分为强制性标准和推荐性标准。保障人体健康和人身财产安全的标准和法律、行政法规规定强制执行的标准是强制性标准, 其他标准是推荐性标准。省、自治区、直辖市标准化行政主管部门制定的工业产品的安全、卫生要求的地方标准, 在本行政区域内是强制性标准。”

建立电磁兼容性标准体系的目的是保证系统内、系统间的电磁兼容性; 保证任一工作系统的设备、人员的安全不因电场环境而受损; 为系统的电磁兼容性分析、预测打下基础; 为建立电磁兼容性数据库提供标准和准则; 为系统频谱管理提供标准和准则; 为遵守国际、国内有关电场规则提供法制性依据。

#### 11.2.1.1 电磁兼容性标准分类

大多数组织的标准体系框架都采用 IEC 的标准分类方法, 将所有标准分成基础标准(出版物)、通用标准(出版物)、产品标准(出版物)(又可分成系列产品标准和专用产品标准)。每类标准都包括发射和抗扰度两方面。

##### 1. 基础标准

基础标准规定达到一般和基本的条件或规则, 它们与所有系列产品、系统或设施有关, 并适用于这些产品, 但不规定产品的发射限位或抗扰度判定准则。它们是制定其他标准(如通用标准

或产品标准)的基础或引用的文件。

基础标准涉及的内容包括术语、电磁现象的描述、兼容性电平规范、干扰发射限值的总要求、测量、试验技术和方法(包括测试设备、辅助设备、基本配置、测量场所等)、试验等级、环境的描述和分类(包括环境的范围和兼容性电平,它们是构成发射限值或抗扰度电平的重要基础)等。

基础标准不涉及具体的产品,仅就现象、环境、试验方法、试验仪器和基本试验配置等给出定义及详细描述。这类标准不给出指令性的限值,以及对产品性能的直接判据,但它是编制其他各级电子设备防干扰标准的基础。属于基础标准范围内的标准有 GB4365《电磁兼容术语》、GB/T6113《无线电干扰和抗扰度测量设备规范》、GB/T6113.2《无线电干扰和抗扰度测量设备规范和测量方法第二部分:干扰和抗扰度测量方法》以及 GB/T17626 有关产品抗扰度测量的系列标准,等等。

## 2. 通用标准

### (1) 通用标准的环境分类

通用防干扰标准是关于特定环境下的标准。它规定一组最低的基本要求,可应用于该特定环境下工作的所有产品或系统。如某种产品无系列产品标准或专用产品标准,可使用通用标准。通用标准将特定环境分为两大类。

#### ① 居住、商业和轻工业环境。

居住环境:如住宅、公寓等居住场所。

商业环境:像商店、超市等零售网点;办公楼、银行等商务楼;电影院、酒吧、舞厅等公共娱乐场所;加油站、停车场、游乐园等室外场所。

轻工业环境:像工场、实验室、维修中心等轻工业场所。

#### ② 工业环境。

工业、科研、医疗等设备的工作场所。

大的感性负载或容性负载频繁开关的场所。

大电流并伴有强磁场的场所。

通用标准给通用环境中的所有产品提出一系列最低的防干扰要求(包括必须进行的测试项目和必须达到的测试要求)。通用标准中提到的测试项目及其试验方法可以在相应的基础标准中找到,而无须在通用标准中作任何介绍。通用标准给出的试验环境、试验要求可以成为产品族标准和专用产品标准的编制导则。同时对于暂时尚未建立电磁兼容性测试标准的产品,可以参照通用标准来进行其电磁兼容性能的摸底。

通用标准描述的环境覆盖了几乎所有民用电气和电子产品的工作环境,因此,通用标准中所提出的试验项目和限值将适用于绝大多数民用电气和电子产品对电磁兼容性的最基本要求。这样,通用标准在电磁兼容标准体系中的重要地位也就不言而喻了。

### (2) 制定和使用中的注意事项

① 通用标准必须参考基础标准,因为它们不包含详细的测量试验方法,以及测量试验设备等。

② 通用标准包含有关的发射(限值)和抗扰度(性能判定)要求及相应的测量规定。

③ 通用标准仅规定了有限的几项要求和测量方法,但这并不妨碍要求产品应设计成具有特定环境下对于各种电磁干扰都能正常工作的性能。

### (3) 通用电磁发射标准的基本内容

① 各试验端口的电磁干扰发射限值。所谓端口是指产品的电磁干扰可能发射的部位,分别指机壳、交流电源线、直流电源线、接地线、信号线和过程控制线。

② 试验中的注意事项。试验应在产品正常使用情况下,以能产生最大电磁干扰发射的工作方式进行。试验中还要适当地改变试品的布局,以便使干扰发射为最大。

试验应将试验中用到的试验仪器、试验方法、试验配置和试验布局等明确记录在案,以备试验能重复进行,试验结果可以追溯。

如果试品只是系统的一部分,或者可能还要连接辅助设备方能体现其功能时,则试品就应当连接所必需的最少辅助设备,并用 GB9254 标准中所描述的方法来检查端口。对于辅助设备的连接情况应当记录在案。

如果试品有许多类似的试验端口,或接法类似的端口,那么应当选择其中足够数量的端口,或接法类似的端口,但要保证这种选择能够覆盖所有不同类型的端口。试验中应将端口选择情况记录在案。

除非另有说明,试验应在额定电压和规定工作条件下进行。

#### (4) 通用抗扰度标准的基本内容

① 各试验端口的抗扰度要求。对一个电气和电子产品来说,有可能只包含一部分端口,故试验应按实际情况来进行。

##### ② 试验中的注意事项。

- 试品应按实际使用中对于干扰最敏感的工作模式进行试验。试验中还要适当改变布局以求达到最大敏感度。
- 试验中应将试验配置、试品的工作方式及试验的布局等情况明确记录在案,以便必要时可以重现试验结果,以资对比。
- 如果在被试产品的用户手册中规定了试品所需的外部保护装置(或保护措施),那么试品就应当在有保护的情况下进行试验。
- 如果试品有许多类似的端口,或接法类似的端口,则试验应当选择足够数量的端口来模拟实际工作情况,并保证能覆盖各种不同类型的端口。但对端口的选择情况要记录在案。
- 除非另有说明,试验应在额定电压和规定的工作条件下进行。

③ 试品性能的评定准则。尽管通用抗扰度标准几乎涉及了所有的民用电气和电子产品,但是试验结果总不外乎是以下几种。

- 情况 A 试品在试验中和试验后都能正常工作,无性能下降或低于制造商规定的性能等级现象发生。
- 情况 B 试品在试验后可以正常工作,且无性能下降或低于制造商所规定的性能等级现象发生。
- 情况 C 允许试品有暂时性的性能降低,只要这种功能是可以通过控制操作、人工复位,甚至是关机后恢复的。

显然上述情况对产品的要求是不同的。情况 A 为最高;情况 C 为最低。对于具体的产品究竟应该认为上述哪一种情况是合格的(所谓判定的准则),应由相应的产品标准或产品制造商给出,而通用标准是无法直接给出的。

#### 3. 系列产品标准

根据适用于产品范围的大小和产品的特性,产品防干扰标准又可进一步分为系列产品(或产品族)标准和专用产品标准。系列产品是指一组类似产品、系统或设施,对于它们可采用相同的标准,例如电信设备、无线电、电视和类似设备。系列产品标准规定了专门的发射和抗扰度要求、限值和测量及试验程序。产品类标准比通用标准包含更多的特殊性和详细的性能要求,以及产品

运行条件等，产品类别的范围可宽可窄。系列产品的测试与限值或性能判定准则（也称“性能判据”）必须与通用电子设备防干扰标准相协调，但与通用标准相比较，应优先采用系列产品防干扰标准。

产品族标准是电子设备防干扰标准中占据份额最多的一类标准。如 GB4343、GB17743、GB9254、GB4824 和 GB13836，分别是关于家用电器和电动工具、照明灯具、信息技术设备、工业、科研和医疗射频设备、声音和广播电视接收设备的无线电干扰特性测量及限值的标准，这些标准分别代表了一个大类产品对电磁干扰发射限度的要求。

4. 专用产品标准

专用产品标准通常不单独形成电磁兼容标准，而以专门条款包含在产品的通用技术条件中。专用产品标准对电磁兼容的要求与相应的产品族标准相一致，在考虑了产品的特殊性之后，也可增加试验项目和对电磁兼容性能要求作某些改变。与产品族标准相比，专用产品标准对电磁兼容性的要求更加明确，而且还增加了对产品性能试验的判据，应比系列产品标准优先采用。对试验方法，应由试验人员参照相应的基础标准进行。表 11-1 给出了一些电子设备的标准。

表 11-1 与电磁干扰和兼容相关的标准

标 题	国 际 标 准	欧洲标准	英 国 标 准
工业、科研和医疗射频设备射频干扰特性的测量方法和极限值	CISPR11	EN55011	BS4809
汽车、机动船和火花塞点火发动机驱动设备的射频干扰特性的测量方法和极限值	CISPR11	EN55011	S833
声音和电视接收机射频干扰特性的测量方法和极限值	CISPR13	EN55013	BS905 第一部分
家用电器和便携式工具射频干扰特性的测量方法和极限值	CISPR14	EN55014	BS800
荧光灯和照明设备射频干扰性的测量方法和极限值	CISPR15	EN55015	BS5394
射频干扰测量装置和测量方法的规范	CISPR16	EN55016	BS727
声音和电视广播接收机敏感度的测量	CISPR20	EN55020	BS905 第二部分
信息技术设备射频干扰特性的测量方法和极限值	CISPR22	EN55022	BS6527
家用电器和类似电气设备引起的电源干扰	IEC555 第 1-3 部分	EN60555	BS5406
工业过程测量恶化控制设备的电磁兼容性	IEC801 第 1-3 部分	HD481	BS6667 第 1-3 部分

虽然一个产品要获得市场的成功，满足这些标准是必要的，而符合这些标准是自愿的。但是，有些国家给出的是规范，而不是标准，因此，要在这些国家销售产品，符合标准是强制性的。有些规范不仅规定了标准，还赋予当局罚没不符合产品的权力。

11.2.1.2 欧洲标准体系

1. 定义

- (1) 电信标准 一种电信设备或一类电信设备使用的标准。
- (2) 无线通信标准 使用无线信号的设备的电信标准。
- (3) 欧洲标准 由欧洲标准化委员会批准的标准；由 CENELEC 批准的标准或协调文件；或由 ETSI 批准的技术报告。
- (4) 协调标准 受欧共体委托，为支持新方法指令的必要要求采用的欧洲标准。
- (5) 技术法规 包括相关主管部门的规定，是强制遵守的，是在市场条件下或在成员国中使用遵守的规定。由本地权威机构制定的法规除外。
- (6) 通用技术法规 已被转化成技术法规的协调标准，其符合性是强制要求的。



(7) 指令 对指令中规定的基本要求各成员国必须予以满足。各成员国必须在一个规定的日期前根据指令制定各自与指令相一致的国家法律和行政法规。

(8) 决定 一种欧盟的法律工具，仅对使用的对象有约束力。例如，个别成员国或企业，它们管制的是特殊的个案。

(9) 向公众征求意见 在采用加权投票程序之前，由国家委员会征求对 EN 草案的接受程度，收到的所有意见和建议，经汇总后提交 ETSI 秘书处。

## 2. 缩写

EC: 欧洲共同体，是欧洲联盟的前身。

EU: 欧洲联盟，简称欧盟。欧盟现有 27 个成员国和 5 亿人口，总部设在比利时首都布鲁塞尔。

CEPT: 欧洲邮政电信主管部门会议。

CEN: 欧洲标准化委员会。

EFTA: 欧洲自由贸易协会。

CTR: 通用技术法规。

EBU: 欧洲广播联盟。

ECTEL: 欧洲电信和专业电子工业协会。

EEA: 欧洲经济区。

EEC: 欧洲经济共同体。

EN: 欧洲标准 (European Norm)。

ERC: 欧洲无线通信委员会。

ETS: 欧洲电信标准。

HD: 协调文件。

I-ETS: 临时欧洲电信标准。

CATV: 有线电视。

NSO: 国家标准化组织。

OJEC: 欧共体的官方期刊。

PMR: 专用移动天线。

SES: 卫星地面站。

TBR: 法规的技术基础。

TTE: 电信终端设备。

## 3. 欧洲电工技术标准化委员会

欧洲电工技术标准化委员会成立于 1973 年，总部设在比利时的布鲁塞尔。它得到欧共体的正式认可，是在电工领域开展标准化活动的组织。它是个非营利性组织，负责协调各成员国在电气领域的所有标准，并负责制定欧洲标准。

## 4. 德国的防干扰标准

德国关于干扰控制的法规是基于 VDE 制定的标准。相关的标准 VDE0871 覆盖了所有产生或处理射频能量的设备。这些极限值不仅适用于所有种类的计算和数字设备，还适用于工业、科学和医疗设备。唯一的限制是设备产生的基频高于 10kHz。

对于数字设备的要求与 FCC 规定的相似，但是频率范围更宽，低频拓展到 10kHz。极限值也分为 A 级和 B 级，更严格的 B 级适用于通用的用途。A 级限于需要特殊安装的设备。VDE 关于辐射和传导的极限值在表 11-2 和表 11-3 中给出。VDE0871 是强制性的，并由德国邮电部执行。

表 11-2 VDE 辐射干扰极限值

频率范围 (MHz)	场强 (μV/m)	
	A 级 100m	B 级 30m
0.01~0.15	34	34
	A 级 30m	B 级 10m
0.15~30	34	34
	A 级 30m	B 级 10m
30~41	54	34
	29.5	34
41~68	54	34
68~174	29.5	34
174~230	54	34
230~470	45	46
470~760	59~57	46
760~1 000		

表 11-3 VDE 传导发射干扰极限值

频率范围 (MHz)	射频电压 (μV)	
	A 级	B 级
0.01~0.15	91~69.5	79~57.5
0.15~0.5	66	54
0.5~30	60	48

5. 英国的防干扰标准

英国防干扰标准应用最多的是 BS6527 关于数据处理和电子办公设备产生的乱真信号的极限值及其测量方法。这个标准的范围和内容与 CISPR22 相同，尽管它们的标题不同。覆盖于 0.15~30MHz 频率范围的 A 级要求适用于商业和工业场合的应用，更严格的 B 级极限值适用于住宅区中使用的设备。两级都包含准峰值和平均测量的要求。两级的极限值数值是相同的，严格度是通过将测量距离从 30m 减小到 10m 来实现的。表 11-4 给出了推荐的辐射场强极限值。表 11-5 给出传导发射的电压极限值。

表 11-4 BS6527 辐射干扰极限值

频率范围 (MHz)	场强 (μV/m)	
	A 级 30m	B 级 10m
30~230	30	30
230~1 000	37	37

表 11-5 BS6527 传导发射干扰极限值

频率范围 (MHz)	射频电压 (μV)			
	A 级		B 级	
	准峰值	平均值	准峰值	平均值
0.15~0.5	79	66	66 减到 56	56 减到 46
0.5~5	73	60	56	46
5~30	73	60	60	50

11.2.1.3 美军标体系

美军标体系由标准、规范和手册三部分组成。常用的标准见表 11-6。

表 11-6 美军常用的标准

序 号	标 准 代 号	标 准 名 称
1	MIL—STD—461	干扰与敏感度要求 (设备、分系统)
2	MIL—STD—462	电磁干扰特性测量
3	MIL—STD—463	电磁干扰术语、单位制
4	MIL—STD—469	雷达工程 EMC 设计要求
5	MIL—STD—220	插入损耗测量方法

续表

序 号	标 准 代 号	标 准 名 称
6	MIL—STD—449	无线电频谱特性测量方法
7	MIL—STD—131	舰船搭接和接地方法
8	MIL—STD—285	电磁屏蔽室衰减测量方法
9	MIL—E—5087	航空系统电气搭接、雷电防护
10	MIL—E—6051	系统电磁兼容性要求
11	MIL—F—15733	无线电干扰滤波器要求

联邦通信委员会（FCC）是负责频率管理和干扰控制的政府机构。FCC 有覆盖多种设备发射限制的规范，这些 FCC 规范给出了两个不同的发射极限值。哪一个极限值适用取决于设备在什么环境中使用。A 级设备被设计成在商业或工业环境中使用，B 级适用于在家庭或居民区内使用的设备。FCC 没有规定屏蔽效能值，而规定了射频发射值。表 11-7 给出了 A 级和 B 级和辐射发射极限值，表 11-8 给出了传导发射极限值。

表 11-7 FCC 辐射干扰极限值

频率范围（MHz）	场强（ $\mu\text{V}/\text{m}$ ）	
	A 级 30m	B 级 3m
30~88	30	100
88~216	50	150
216~1 000	70	200

表 11-8 FCC 传导发射干扰极限值

频率范围（MHz）	射频电压（ $\mu\text{V}$ ）	
	A 级	B 级
0.45~1.6	1 000	250
1.6~30	3 000	250

11.2.1.4 我国的防干扰标准体系

我国标准化工作起始于 20 世纪 60 年代，1983 年发布第一个电子设备防干扰标准。1986 年成立了全国无线电干扰标准化技术委员会（简称无干委），并先后成立了 A、B、C、D、E、F、G、S 八个分技术委员会。随着信息产业部的成立和我国信息产业的迅猛发展，通信设备的安全性和可靠性越来越受到人们的重视，特别是无线通信的发展对国家的频谱管理和空间电磁波的干扰以及人身安全等方面提出了更高的要求。

1. 电子设备防干扰国家规范

电子设备防干扰规范的目标是把现行有关的强制标准的共性要求归结到“通用要求”中，既要体现国家政府强制性的技术规定，又要具有实用性。规范涉及产品电子设备防干扰、无线电通信电磁环境保护要求和电磁场辐射对人体影响的安全标准等三大领域。

（1）产品分类

规范原则上把可以采用相同的防干扰标准的产品划分为一类，具体分类如下（但不限于以下分类）：

- ① 工业、科学和医疗射频设备。
- ② 车辆、机动船及火花点火发动机驱动装置。
- ③ 声音和电视广播接收机。
- ④ 家用电器和类似器具。
- ⑤ 电动工具。
- ⑥ 电气玩具。
- ⑦ 电气照明设备和类似设备。

- ⑧ 输变电设备。
- ⑨ 信息技术设备。
- ⑩ 其他设备系统。

#### (2) 技术要求

产品产生的电磁干扰应不超过该规范规定的干扰限值；产品具有的抗扰度性能应符合该规范规定的抗扰度限值。

#### (3) 产品认证

生产、销售该标准适用范围内产品的企业和个人应向国家质量技术监督局设立和授权的电磁兼容认证机构申请安全认证。经认证合格的，由认证机构批准认证，颁发认证证书。未经认证或认证不合格的产品不得进入市场。

电子设备防干扰认证的基本模式为型式试验加工厂质量体系检查及认证后监督。

#### (4) 监督管理

生产、销售本规范所适用范围内产品的企业和个人应接受国家和地方产品质量监督部门组织的产品监督和抽查，根据监督抽查的需要，可以对产品进行检验。监督抽查的产品不符合该规范要求的，应限期整改，整改后仍不合格的，责令停止生产、销售。

抽查的样品应当在市场上或者企业的产品仓库内的待销产品中随机抽取。

#### (5) 特殊措施

该规范的实施不应妨碍政府、企业和个人为了解决电子设备防干扰问题，在特定场合就产品的服务和使用所采取的特殊措施，如为了保护那些用于安全目的的公共电信网络、接收台或发射台就其装置的安装所采取的特殊措施。

### 2. 电子设备防干扰标准体系

#### (1) 我国的电子设备防干扰标准可分为 4 类

① 基础标准。涉及电子设备防干扰术语、电磁环境测量设备规范和测量方法等，如《电磁兼容术语》。

② 通用标准。其中 GB8702 主要涉及在强磁场环境下对人体的保护要求。

③ 产品类标准。在我国此类标准数量最大，如 GB13837 等。

④ 系统间防干扰标准。在这些标准中，大都根据多年的研究结果规定了不同系统之间的防护距离。例如，机场中的通信导航设备为防护广播电台、短波通信发射台、高压电力系统、电气化铁道等系统所需的保护距离。

(2) 三个层次 标准体系分基础标准、通用标准和产品标准三个纵向层次构成，每一个层次都包含两个方面的标准，即发射和抗扰度。通用标准又按产品的使用环境将产品标准分为 A 类和 B 类。产品类标准通常是基于基础标准和通用标准基础上的更简明的技术文件。层次越低，规定越详细、明确、操作性越强；反之，标准的包容性越强，适用性越广。系统间防干扰标准则属于不同系统间的横向联系。

国家电子设备防干扰标准绝大多数引自国际标准，其来源包括引自国际无线电干扰特别委员会出版物；引自国际电工委员会的标准；部分引用美国军用标准；部分引用国际电信联盟有关建议。由于我国国家标准大多数引自国际标准（尤其是产品类标准），因而做到了与国际标准接轨，这为我国产品出口到国外奠定了电子设备防干扰的基础。

我国军用电磁兼容标准有 GJB151A—1997 军用电子设备和分系统电磁发射和敏感度要求，它是仿照美军标 MIL—STD—461D；GJB152A—1997 军用电子设备和分系统电磁发射和敏感度测

量,它是仿照美军标 MIL—STD—462D; GJB76—1985 电磁干扰和电磁兼容性名词术语,它是仿照美军标 MIL—STD—463A。

我国民用电磁兼容标准有 GB6833—1987 电子测量仪器电磁兼容性实验规范; GB7343—1987 无源无线电干扰滤波器和抑制元件抑制特性的测量方法 (CISPR18-1986); GB11190—1990 高性能屏蔽室屏蔽效能的测量方法; IEC1000—4—1 抗扰度测试综述; IEC1000—4—2 静电放电抗扰度试验; IEC1000—4—3 无线电频率电磁辐射场抗扰度试验; IEC1000—4—4 电快速瞬变脉冲抗扰度试验; IEC1000—4—5 浪涌抗扰度试验; IEC1000—4—6 由射频磁场引起的传导抗扰度试验等。

我国现行的电子设备防干扰标准见表 11-9。

表 11-9 我国现行的电子设备防干扰标准

标准代号	标准名称	对应国际/国外标准	类别
GB/T4365—1996	电磁兼容术语	IEC50、IEC161 (90)	基础
GJB76—85	电磁干扰和电磁兼容性名词术语		基础
GB/T6113—1995	无线电干扰和抗扰度测量设备规范	CISPR16 1 1993	基础
GB/T6113.2—1998	无线电干扰和抗扰度测量方法	CISPR16 2 1993	基础
GB 3907—83	工业无线电干扰基本测量方法	CISPR16 1977	基础
GB 4859—84	电气设备的抗扰度基本测量方法		基础
GB/T15658—1995	城市无线电噪声测量方法		基础
GB8702—88	电磁辐射防护规定		通用
GB/T13926.1—92	工业过程测量和控制装置的电磁兼容性总论	IEC 801 1	通用
GB/T13926.2—92	工业过程测量和控制装置的电磁兼容性静电放电要求	IEC 801 2	通用
GB/T13926.3—92	工业过程测量和控制装置的电磁兼容性辐射电磁场要求	IEC 801 3	通用
GB/T13926.4—92	工业过程测量和控制装置的电磁兼容性电快速瞬变脉冲群要求	IEC 801 4	通用
GB/T 14431—93	无线电业务要求的信号/干扰保护比和最小可用场强		通用
GB4824—1996	工业、科学和医疗 (ISM) 射频设备电磁干扰特性的测量方法和限值	CISPR11 (90)	产品类
GB4343—1995	家用和类似用途电动、电热器具、电动工具以及类似电器无线电干扰特性测量方法和允许值	CISPR14 (93)	产品类
GB4343.2—1999	电磁兼容家用电器、电动工具和类似器具的要求 第 2 部分: 抗扰度-产品类标准	CISPR14—2: 1997	产品类
GB/T17618—1998	信息技术设备抗扰度限值和测量方法	CISPR24 (97)	产品类
GB/T17619—1998	机动车电子器组件的电磁辐射抗扰度限值和测量方法		产品类
GB/T17624.1—1998	电磁兼容综述电磁兼容基本术语和定义的应用与解释	IEC61000—1—1	基础
GB17625.1—1998	低压电气及电子设备发出的谐波电流限值 (设备每相输入电流<16A)	IEC61000—3—2 (1995)	基础
GB17625.2—1999	电磁兼容限值对额定电流不大于 16A 的设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限制	IEC 61000—3—3	基础
GB/T17626.1—1998	电磁兼容试验和测量技术 抗扰度试验总论	IEC61000—4—1 (1992)	基础
GB/T17626.2—1998	电磁兼容试验和测量技术 静电放电抗扰度试验	IEC61000—4—2 (1995)	基础
GB/T17626.3—1998	电磁兼容试验和测量技术 射频电磁场抗扰度试验	IEC61000—4—3 (1995)	基础
GB/T17626.4—1998	电磁兼容试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验	IEC61000—4—4 (1995)	基础
GB/T17626.5—1999	电磁兼容试验和测量技术 浪涌 (冲击) 抗扰度试验	IEC 61000—4—5	基础
GB/T17626.6—1998	电磁兼容试验和测量技术 射频场感应的传导抗扰度	IEC61000—4—6 (1996)	基础
GB/T17626.7—1998	电磁兼容试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和测量仪器导则	IEC61000—4—7 (1991)	基础
GB/T17626.8—1998	电磁兼容试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验	IEC61000—4—8 (1993)	基础
GB/T17626.9—1998	电磁兼容试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验	IEC61000—4—9 (1993)	基础

续表

标准代号	标准名称	对应国际/国外标准	类别
GB/T17626.10—1998	电磁兼容试验和测量技术 阻尼振荡磁场抗扰度试验	IEC61000—4—10 (1993)	基础
GB/T17626.11—1998	电磁兼容试验和测量技术 振荡波抗扰度试验	IEC61000—4—11 (1995)	基础
GJB/Z17—1991	军用装备电磁兼容性管理指南		基础
GJB/Z25—1991	电子设备和设施的接地、搭接和屏蔽设计指南		基础
GJB/Z54—1994	系统预防电磁能量效应的设计和试验指南		基础
GJB/Z105—1998	电子产品防静电控制手册		基础
GJB1110—1991	接地、搭接和屏蔽设计的实施		基础
GJB1389—1992	系统电磁兼容性要求		基础
GJB2079—1994	无线电系统间干扰的测量方法		系统间
GJB2081—1994	87~108MHz 频段广播业务和 108~137MHz 频段航空业务之间的兼容		系统间
GJB2926—1997	电磁兼容性测试试验室认可要求		产品类
GJB3007—1997	防静电工作区技术要求		产品类
GJB151A—97	军用电子设备和分系统电磁发射和敏感度要求		系统间
GJB152A—97	军用电子设备和分系统电磁发射和敏感度测量		系统间
GB11190—90	高性能屏蔽室屏蔽效能的测量方法		产品类
GB6833.1—86	电子测量仪器电磁兼容性试验规范总则		产品类
GB6833.2—87	电子测量仪器电磁兼容性试验规范 磁场敏感度试验		产品类
GB6833.3—87	电子测量仪器电磁兼容性试验规范 静电放电敏感度试验		产品类
GB6833.4—87	电子测量仪器电磁兼容性试验规范 电源瞬态敏感度试验		产品类
GB6833.5—87	电子测量仪器电磁兼容性试验规范 辐射敏感度试验		产品类
GB6833.6—87	电子测量仪器电磁兼容性试验规范 传导敏感度试验		产品类
GB6833.7—87	电子测量仪器电磁兼容性试验规范 非工作状态磁场干扰试验		产品类
GB6833.8—87	电子测量仪器电磁兼容性试验规范 工作状态磁场干扰试验		产品类
GB6833.9—87	电子测量仪器电磁兼容性试验规范 传导干扰试验		产品类
GB6833.10—87	电子测量仪器电磁兼容性试验规范 辐射干扰试验		产品类
GB7343—87	10kHz~30MHz 无源无线电干扰滤波器和抑制元件抑制特性的测量方法		产品类
GB7349—87	高压架空输电线、变电站无线电干扰测量方法	CISPR 18 1986	产品类
GB9254—1998	信息技术设备的无线电骚扰限值和测量方法	CISPR 22 1997	产品类
GB9383—1995	声音和电视广播接收机及有关设备传导抗扰度限值及测量方法	CISPR20 (90)	产品类
GB13421—92	无线电发射机杂散发射功率电平的限值和测量方法		产品类
GB13836—92	30MHz~1GHz 声音和电视信号的电缆分配系统设备与部件辐射干扰特性允许值和测量方法	IEC 728 1 1986	产品类
GB13837—1997	声音和电视广播接收机及有关设备无线电干扰特性限值和测量方法	CISPR13 (1996)	产品类
GB/T13838—92	声音和电视广播接收机及有关设备辐射抗扰度特性允许值和测量方法	CISPR20 (90)	产品类
GB13839—92	声音和电视广播接收机及有关设备内部抗扰度允许值和测量方法	CISPR20	产品类
GB14023—92	车辆、机动船和由火花点火发动机驱动的装置的无线电干扰特性的测量方法及允许值	CISPR 11 1990	产品类
GB15540—1995	陆地移动通信设备电磁兼容技术要求和测量方法		产品类
GB15707—1995	高压交流架空送电线无线电干扰限值	CISPR 18—1986	产品类
GB/T15708—1995	交流电气化铁道电力机车运行产生的无线电辐射干扰的测量方法		产品类
GB/T15709—1995	交流电气化铁道接触网无线电辐射干扰测量方法		产品类
GB15734—1995	电子调光设备无线电干扰特性限值及测量方法		产品类

续表

标准代号	标准名称	对应国际/国外标准	类别
GB 15949—1995	声音和电视信号的电缆分配系统设备与部件抗扰度特性限值和测量方法	IEC 728 1 1986	产品类
GB/T16607—1996	微波炉在 1GHz 以上的辐射干扰测量方法	CISPR19 (83)	产品类
GB16787—1997	30MHz~1GHz 声音和电视信号的电缆分配系统辐射测量方法和限值	IEC 728 1 1986	产品类
GB7343—1987	无源无线电干扰滤波器和抑制元件抑制特性的测量方法	CISPR18—1986	产品类
GB6364—86	航空无线电导航台站电磁环境要求		系统间
GB6830—86	电信线路遭受强电线路危险影响的容许值		系统间
GB7432—87	同轴电缆载波通信系统抗无线电广播和通信干扰的指标		系统间
GB7433—87	对称电缆载波通信系统抗无线电广播和通信干扰的指标		系统间
GB7434—87	架空明线载波通信系统抗无线电广播和通信干扰的指标		系统间
GB7495—87	架空电力线路与调幅广播收音台的防护间距		系统间
GB13613—92	对海中远程无线电导航台站电磁环境要求		系统间
GB13614—92	短波无线电测向台(站)电磁环境要求		产品类
GB13615—92	地球站电磁环境保护要求		产品类
GB13616—92	微波接力站电磁环境保护要求		产品类
GB13617—92	短波无线电收信台(站)电磁环境要求		产品类
GB13618—92	对空情报雷达站电磁环境保护要求		产品类
GB/T13620—92	卫星通信地球站与地面微波站之间协调区的确定和干扰计算方法		产品类
GB9254—1998	信息技术设备的无线电干扰限值和测量方法	CISPR22 (1997)	产品类
GB17743—1999	电气照明和类似设备的无线电干扰特性的限值和测量方法	CISPR15 (1996)	产品类
QJ 1111—87 0112;V06	航天系统地面设施接地要求	国内	产品类
QJ 1113—87 0112;V06	电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法	国内	通用
QJ 1539—88 0112;V751	航天遥测系统的电磁兼容性要求和测量方法	国内	产品类
QJ 1692—89 0112;V06	航天系统地面设施电磁兼容性要求	国内	产品类
QJ 1693—89 0112;V06	电子元器件防静电要求	国内	产品类
QJ 1760—89 0112;V06	用频谱仪测量电磁干扰的方法	国内	通用
QJ 1874—90 0112;V06	接地、搭接和屏蔽的设计应用	国内	通用
QJ 1875—90 0112;V06	静电测试方法	国内	通用
QJ 1875A—98 0112;V06	静电测试方法	国内	通用
QJ 1950—90 0112;V06	防静电操作系统技术要求	国内	通用
QJ 2177—91 0112;V06	防静电安全工作台技术要求	国内	通用
QJ 2245—92 0112;V06	电子仪器和设备防静电要求	国内	产品类
QJ 2256—92 0112;V06	系统预防电磁能量效应的设计和试验指南	国内	通用
QJ 2266—92 0112;V06	航天系统电磁兼容性要求	国内	产品类
QJ 2268—92 0112;V711	地(舰)空导弹武器系统抗干扰性能要求	国内	产品类
QJ 2350—92 0112;V06	电磁辐射敏感度的测试方法 横电磁波传输室测量	国内	通用
QJ 2892—97 0112;V06	EMI 衬垫的测量与评价方法	国内	产品类
QJ 3035—98 0112;V27	电子机柜电磁屏蔽要求和测试方法	国内	产品类

### 11.2.1.5 信息电子设备防干扰标准

#### 1. 国外信息设备防干扰的相关标准

表 11-10 是国外关于信息技术设备防干扰的相关标准。

表 11-10 信息技术设备（ITE）的防干扰标准

	IEC/CISPR	FCC	CENELEC	英国标准
传电和辐射发射	CISPR22	15 部分 J 子部分	EN55022	BS6527
关于以下的敏感度				
静电放电	IEC801-2	—	EN55 101-2	BS6667 第二部分
辐射电磁场	IEC801-3	—	EN55 101-3	BS6667 第三部分
电气快速瞬态	IEC801-4	—	—	BS6667 第四部分
电源线浪涌	IEC801-5	—	—	BS6667 第五部分
辐射磁场	CISPR	—	未发表的建议稿	—
远程通信线路的传导发射	CISPR	—	—	—

2. 国内信息技术设备的防干扰标准

(1) 信息技术设备的定义

信息技术设备额定电压不超过 600V；能对数据和电信消息进行录入、存储、显示、检索、传递、交换或控制（或几种功能的组合）；该设备可以配置一个和多个通常用于信息传递的终端端口。

根据产品的使用环境，信息技术设备分为 A 级和 B 级，它们分别要满足 A 级电磁兼容标准和 B 级电磁兼容标准，B 级标准要严于 A 级标准。

① 一般来说，在以下场所使用的信息技术设备属于 B 级：

- 住宅区，如四合院、公寓等。
- 商业区，如商店、超市等。
- 商务区，如写字楼、银行等。
- 公共娱乐场所，如电影院、餐馆、迪厅等。
- 户外场所，如加油站、停车场和体育中心等。
- 轻工业区，如车间、实验室等。

② 满足 A 级电磁兼容标准的产品在使用说明书或产品标牌上通常作这样的声明：此产品满足电磁兼容 A 级，在生活环境中，该产品可能会造成无线电干扰。在这种情况下，可能需要用户对其干扰采取切实可行的措施。

(2) 限值

① 电源端子的传导干扰限值。电磁干扰可以通过设备的电源端子传导发射，造成电网的污染。因此，电磁兼容标准中对电源端子的传导干扰发射进行了限制，这就是电源端子传导发射限值。表 11-11 给出了 A 级和 B 级电源端子的传导干扰限值。

表 11-11 电源端子的传导干扰限值

A 级			B 级		
频率范围（MHz）	限值（dBμV）		频率范围（MHz）	限值（dBμV）	
	准峰值	平均值		准峰值	平均值
0.15~0.50	79	66	0.15~0.50	66~56	56~46
0.50~50	78	60	0.50~5	56	46
			5~30	60	50

② 电信端口的共模传导干扰限值。电缆上的共模电流会产生很强的电磁辐射，大部分设备在不联电信电缆时能够顺利通过有关的标准，而联上电缆后就不再满足标准的要求，这就是由于电缆中共模电流产生了共模辐射。因此表 11-12 给出了 A 级和 B 级电信端口的共模传导干扰限值。



表 11-12 电信端口的共模传导干扰限值

频率范围 (MHz)	A 级				B 级			
	电压限值 (dBμV)		电流限值 (dBμA)		电压限值 (dBμV)		电流限值 (dBμA)	
	准峰值	平均值	准峰值	平均值	准峰值	平均值	准峰值	平均值
0.15~0.5	97~87	84~74	53~43	40~30	84~74	74~64	40~30	30~20
0.5~30	87	74	43	30	74	64	30	20

③ 辐射发射干扰限值。信息设备在工作时会向空间辐射电磁波，这构成了对其他设备的干扰，特别是对无线接收设备的影响很大。因此，表 11-13 给出了 A 级和 B 级辐射干扰限值。

表 11-13 辐射干扰限值

频率范围 (MHz)	准峰值 (dBμV/m)	
	A 级	B 级
30~230	40	30
230~1000	47	37

④ 机箱的抗扰度限值。机箱要对外界的各种干扰有一定的抵抗能力，根据实际环境中存在的干扰，分为表 11-14 所示的三类。

表 11-14 机箱抗扰度试验限值

电 磁 环 境	抗扰度限值
工频磁场	50 或 60Hz 1A/m (r.m.s)
射频电磁场	≤80~1 000MHz 3V/m (r.m.s, 未调制) 80%AM (1kHz)
静电放电	4kV (接触放电) 8kV (空气放电)

⑤ 信号端口和抗扰度限值。信号端口上的干扰来自空间电磁波在电缆上感应的电流，根据实际环境中的电磁干扰现象，有表 11-15 所示的三种。

表 11-15 信号端口和电信端口抗扰度限值

电 磁 环 境	抗扰度限值
射频连续波传导	0.15~80MHz 3V (r.m.s, 未调制) 80% AM (1kHz)
浪涌 (冲击)	1.5kV (峰值) 4kV (峰值) 10/700μs
电快速瞬变脉冲	0.5kV (峰值) 5/50ns 5kHz (重复频率)

⑥ 直流电源端口抗扰度限值 (见表 11-16)。

表 11-16 电源输入端口的抗扰度限值

电 磁 环 境	抗扰度限值
射频连续波传导	0.15~80MHz 3V (r.m.s, 未调制) 80%AM (1kHz)
浪涌 (冲击)	1.2/50 (8/20) μs 0.5kV (峰值)
电快速瞬变脉冲	0.5kV (峰值) 5/50ns 5kHz (重复频率)

⑦ 交流电源端口抗扰度限值 (见表 11-17)。

表 11-17 交流电源端口的抗扰度要求

电 磁 环 境	抗扰度限值
射频连续波传导	0.15~80MHz 3V (r.m.s, 未调制) 80%AM (1kHz)
电压暂降	>95%减小 0.5 周期 30%减小 25 周期
电压短时中断	>95%减小 250 周期
电快速瞬变脉冲	1.0kV 5/50ns 5kHz (重复频率)

### (3) 测量方法

① 电源端子传导干扰测量方法。进行电源端子传导发射测量需要下述 3 种设备。

a. 干扰测量设备 用来定量计量干扰强度的设备, 可以是 EMI 测量接收机, 也可以是频谱分析仪; 频率范围要覆盖 150kHz~30MHz, 具有峰值、准峰值和平均值检波功能, 满足 GB/T6113.1 规定的要求。

b. 线路阻抗稳定网络 (LISN) 由于电源端子传导发射的强度与电网的阻抗有关, 因此, 为了使测量具有唯一性, 必须在特定的阻抗条件下测量, LISN 就提供了这样一个环境, GB9254 标准中使用的 LISN 为 50Ω/50μH, 应符合 GB/T6113.1 第 8 章规定的要求。

c. 试验桌 受试设备要放置在接地金属板上进行试验, 该金属板比被测设备边框大 0.5m, 最小尺寸为 2m×2m。

电源端子传导干扰测量主要是测量被测设备沿着电源线向电网发射的干扰电压; 做这项试验时要注意调整受试设备的工作状态, 找出最大干扰所对应的工作状态作为试验结果。

② 电信端口共模干扰测量方法。

a. 测量设备。

干扰测量设备: 用来定量计量干扰强度的设备, 同电源端口传导发射测量的要求相同。

阻抗网络: 共模终端阻抗为  $150\Omega \pm 20\Omega$ , 相角  $0^\circ \pm 20^\circ$ ; 隔离度在 150kHz~1.5MHz 为 35~55dB, 随频率增高线性上升, 在 15~30MHz 时大于 55dB; 纵向转换损耗对 3 类电缆 150kHz~1.5MHz 为  $80 \sim 55\text{dB} \pm 3\text{dB}$ , 1.5~30MHz 时大于  $50 \sim 25\text{dB} \pm 3\text{dB}$ , 并随频率线性下降。

容性电压探头: 阻抗  $> 1\text{M}\Omega$ , 并联电容  $< 5\text{pF}$ 。

电流探头: 插入阻抗  $\leq 1\Omega$ 。

试验桌: 比被测设备边框大 0.5m, 最小尺寸为 2m×2m。

b. 测量方法。

电信端口配置为两组以上平衡对线或非屏蔽电缆时, 采用电压法和电流法; 电信端口配置为平衡电缆或同轴 (屏蔽) 电缆时, 采用电流法。

③ 辐射干扰测量方法。

a. 测量设备与场地。

椭圆形开阔场或半电波暗室: 水平和垂直场地衰减测量值与理想场地的理论值之差不得大于  $\pm 4\text{dB}$ 。

测量接收机: 30~1 000MHz, 满足 GB/T6113.1。

天线: 对数偶极子天线或双锥天线, 满足 GB/T6113.1。

接地平板: 符合 GB/T6113.1。

b. 测量方法。

将天线取水平极化方向并置于某一适当高度, 转台置于某一适当角度, 在 30~1 000MHz 范围内用峰值检波进行初测; 在  $0^\circ \sim 360^\circ$  之间旋转转台, 在初测时干扰较大的频率点上, 寻找被测设备最大干扰电平 (准峰值); 在 1~4m 高度范围内升降天线, 寻找该频率点上的最大干扰电平; 改变天线极化方向, 改为垂直极化, 重复上述测量。

④ 静电放电抗扰度试验。

放电次数和部位: 对受试设备进行 200 次放电, 其中, 150 次分别在 3 个试验点上直接进行接触放电; 另一个试验点选在水平耦合板前边缘中心, 进行 50 次间接放电, 对孔、缝隙等每个试验点至少进行 10 次单次空气放电。

放电极性：进行正、负极性的静电放电。

⑤ 射频电磁场辐射抗扰度试验。

频率范围：80~1 000MHz。

试验信号：用 1kHz 正弦波对试验信号进行 80%幅度调制。

⑥ 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验。

设备有多个相同端口时，仅对其中之一进行试验；多芯电缆按单根电缆进行试验；不超过 3m 长的数据电缆端口不进行此项试验。

⑦ 电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验。

对试验电压暂降规定为周期>95%、30%两个等级，对应两个不同的试验周期：0.5、25。

⑧ 射频场感应的传导干扰抗扰度试验。

对受试设备只施加 3Vrms（未调制）试验电压。

⑨ 浪涌（冲击）抗扰度试验。

D.C.电源端口（仅适于直接与室外电缆连接的端口）施加 0.5kV（线-地）干扰电压；A.C.电源端口施加 1kV（线-线）、2kV（线-地）干扰电压；直接与室外连接的信号和电信端口施加 1.5kV、4kV 干扰电压。

#### （4）无线电干扰和抗扰度测量设备规范简介

该标准规定了无线电干扰电压、干扰电流和干扰场强的测量设备的电气性能和机械特性，其频率范围为 9kHz~18GHz。此外，对于用于不连续干扰测量的专用设备也提出了要求。这些要求包括无线电干扰的宽带测量和窄带测量。

该标准规定的测量接收机的特性必须在其所有的频率和无线电干扰电压、电流、功率或场强的所有电平上得到满足。所涉及的测量接收机的类型包括准峰值、峰值、平均值、方均根值测量接收机。需要注意以下几点：

① 准峰值是国际上多年来沿用得最久、应用最广泛的表征电磁干扰的一种特征值。对于同一个宽带干扰，测量得到的准峰值低于峰值，高于平均值和方均根值。准峰值的特点是既可反应脉冲干扰的幅度也可反应其重复频率特征，并且其电平与人类的听觉对脉冲型干扰的主观感觉有很大的相关性。接收机与频谱分析仪的很大区别在于具有准峰值检波。

② 对于正弦波信号，峰值、平均值、方均根值之间有严格与明确的关系。但是对于各种波形或频谱的电磁噪声而言，三种特征值之间的关系是不确定的。当然，对于准峰值就更没有明确的相关性。各个值之间的相关性取决于电磁干扰本身的波形。若需在不同值之间转换，只有依靠分别测量。

③ 对于测量接收机的设计与制作，有一系列的指标需要满足。这些指标中最主要的包括通带的带宽及选择性曲线的形状、检波器的无放电时间常数、检波器前后的过载系数（反应电路的线性）、电表的机械时间常数等。由于这些指标的要求，使得电磁干扰测量接收机的技术要求高于一般通信广播接收机。

④ 传导干扰和辐射干扰测量中，最小带宽应为 6dB 带宽。

#### 11.2.1.6 电子设备的防静电标准

##### 1. IEC（国际电工技术委员会）关于防静电标准制订简况

###### （1）IEC/TC65

IEC 于 1984 年首次制订发布了 IEC801—2《工业过程测量和控制装置的电磁兼容性 第 2 部

分：静电放电要求》（已同名等效转化为我国标准 GB/T13926.2—92），1991 年 4 月该标准进行了全面修订，现行有效版本为第 2 版。该标准规定了工业过程测量和控制装置对因操作者触摸这类装置而产生静电放电或与装置附近的物体间产生的静电放电的敏感性试验的严酷等级和试验方法，以此评价工业过程和测量装置对静电放电的敏感性。

### （2）IEC/TC77/SCB

按照 IEC 导则 107《起草电磁兼容性标准出版物的指南》规定，TC77 的主要任务是制订关于发射、抗扰度及试验方法等有广泛使用意义的通用性基础文件。为了提高效率，TC77 不介入由其他 TC 专门负责的课题，但由这些 TC 制订的文件均以适当的方式汇入 TC77 的工作领域中来。鉴于此，由 TC65 制订的 IEC801-2 标准由 TC77 的 B 分技术委员会接管、组织修订并将其转换为新的标准 IEC—2000—4—2《电磁兼容性 第 4 部分：试验和测量程序 第 2 节：静电放电和抗扰度试验》。

### （3）IEC/TC15/SC15D

该分技术委员会专门从事绝缘材料静电学研究，其任务如下：

鉴别并说明静电现象在电气工业和非电气工业中的利与弊，提供有关的术语、分类、方法和手段的指南，以增加工业效益并减少危害。

规定试验方法和相关要求，用以评定材料表面静电荷的产生、存留和耗散，并与 ISE/ISO 中有关的技术委员会密切协作，提供关于产品的指南。

根据与 IEC/TC31 爆炸性环境用电气设备技术委员会协议的课题，确定在危害环境下静电放电的后果。

提供模拟静电现象和静电放电方法的指南，不包括对静电放电的电气设备的功能抗扰度的试验方法。

SC15D 制订的静电测量、防护标准有《利用直接测量静电荷耗散率的方法测试绝缘和静电耗散材料及其表面》、《测定材料与表面耗散静电荷能力的试验方法》、《摩擦静电效应的评定》、《摩擦静电特性的评定》、《装配地板和地板覆盖层的静电效应特性化的试验方法》、《用于控制静电的材料的电阻率测量》和《抗静电电子器件防护的通用要求》。

《静电敏感器件 对短时电压脉冲敏感的电子器件的试验方法》适用于 MOS 器件和微波半导体器件，旨在确定器件的内防护适应性，以利于指导设计。《静电敏感器件的防护》旨在帮助敏感器件的使用者掌握静电防护要领，包括操作、标识、责任、培训和检查等各个方面，以建立可靠的静电防护控制系统；同时，它还提供设计、材料选择、工作区、各种器具、地面、服装等工作或性能方面的要求及包装、检查、试验等的程序和方法。这份标准的内容较为充实，系统性强，涉及到敏感器件静电防护问题的方方面面，尤其对静电防护区的工作要求规定严密而细致，并附有示意图，这对需要建立静电防护场所的局部环境很有现实指导意义。

## 2. MIL 防静电标准制订简况

美国《电气和电子零件、组件与设备（电气触发引爆装置除外）的静电放电防护控制大纲》涉及对易遭静电损害的电气电子零件在设计、试验、检查、维修、制造、加工、装配、安装、包装、储存等各个环节在制订和实施静电放电控制的要求，及对执行这些要求的情况进行检查和评审。本标准适用于静电敏感电压小于 16 000V 的三类电子产品：I 类为 0~1 999V；II 类为 2 000~3 999V；III 类为 4 000~15 999V。在标准附录中给出了通过试验确定产品敏感类别的准则和程序。

《电气和电子零件、组件与设备（电气触发引爆装置除外）的静电放电防护控制手册》为制

订、实施和监督静电放电控制计划提供指南,重点包括鉴别电气和电子零件、组件与设备上静电放电的起因及后果;静电放电的控制预防措施对静电放电防护材料和设备的选择与应用考虑;静电放电防护工作区相接地工作台的设计与构造;静电敏感产品的操作、处理、包装和标志;人员培训计划的制定;静电放电防护工作区及接地工作台的鉴定等。手册的特点是指南性质,所提供的数据、资料详细,可操作性强。例如,该标准对于静电起因、摩擦起电系列、静电敏感产品的失效类型和失效机理与特征等,都有详细的描述;在静电放电试验方面,它认为操作者的人体本身是损坏敏感产品的主要静电放电源,故而提出了人体放电模型的概念,建立了人体放电模拟电路,并依据大量试验统计数据,确定模拟电路中使用的模拟人体电容为  $100\text{pF}$ ,模拟人体电阻为  $1500\Omega$ ,并对此给予了必要的理论论证,认为这是一个合理的、标准化的试验电路。

《静电放电防护包装》军标手册是产品在包装、运输、储存和装配加工过程中,从产品传递的角度来考虑静电敏感产品的防护问题。它为有关防静电包装材料的使用提供了具体指南,因而可操作性极强。

### 3. 国内防静电标准制订简况

现已发布的标准有 GB11059—89《电子工业用合成纤维防静电网性能及试验方法》、GB/T13926.2—92《工业过程测量和控制装置的电磁兼容性 静电放电要求》、SJ20154—92《信息技术设备静电放电敏感度试验》、QJ1875—90《静电测试方法》、QJ1693—89《电子元器件防静电要求》、QJ1950—90《防静电操作系统技术要求》等。

国内防静电标准化工作的开展还远赶不上工业发达国家,许多问题尚未被认识,所以,消化吸收国际先进标准是提高我国标准水平的捷径。凡国内适用的标准应予以安排转化,转化本身是一个深入分析、对照和研究的过程,对于国外同样标准中不一致的条款,应当通过分析研究选用,而不宜盲目套用。

## 11.2.2 电子设备防干扰认证

### 11.2.2.1 概述

强制性产品认证制度,是各国政府为保护广大消费者人身安全,依照法律法规实施的一种产品合格评定制度,它要求产品必须符合国家标准和技术法规。强制性产品认证,通过制定强制性产品认证的产品目录和实施强制产品认证程序,对列入《目录》中的产品实施强制性的检测和审核。凡列入强制性产品认证目录内的产品,没有获得指定认证机构须发的认证证书,没有按规定实施认证标志,一律不得进口、不得出厂销售和在经营服务场所使用。

强制性产品认证制度在推动国家贯彻各种技术法规和标准、规范市场秩序、打击假冒伪劣行为、促进产品的质量管理水平和保护消费者权益等方面,具有其他工作不可替代的作用和优势。认证制度由于其科学性和公正性,已被世界大多数国家广泛采用。实行市场经济制度的国家,政府采用强制性产品认证制度作为产品市场准入的做法,正日益获得国际上的广泛认同。

#### 1. 合格评定的定义和作用

合格评定是直接或间接确定相关要求被满足的活动。典型的合格评定活动有抽样、试验、检验、评审、验证、合格保证(供方的声明、认证)、注册、认可和批准。

合格评定活动的作用如下:

(1) 可达到政府保护本国消费者利益的目的,例如,证实电气产品符合电气安全、电子设备防干扰方面的要求。

(2) 可实现政府对本国环境保护的要求, 例如, 可以对污染物和有毒物质进行控制, 并对动植物资源进行保护。

(3) 提倡采用国际标准和规范, 政府可通过合格评定活动促进本国产品的竞争力。

(4) 有助于企业的持续发展, 可体现制造商对用户利益的承诺。

## 2. 合格评定的主要范围

(1) 认证 产品质量认证; 质量体系认证。

(2) 认可 校准/检验机构认可; 审核机构认可; 认证机构认可; 审核员/评审员资格认可; 培训机构的认可。

## 3. 常用产品合格评定的形式

(1) 法规强制模式

模式 1: 由指定机构做样品检测+质量体系认定。例如, 在中国、韩国、澳大利亚等国家采用。

模式 2: 厂商自我声明。例如: 在捷克、沙特阿拉伯、美国等国家采用。

模式 3: 规定合格标签+厂商自我声明。例如: 在欧盟国家中采用。

(2) 市场要求模式

通常是规定合格标签+厂商自我声明。例如, 在德国、奥地利、瑞典等国采用, 但仅对部分产品有效。

### 11.2.2.2 国外部分强制性认证简介

#### 1. CB 体系

IECEE 表示 “The IEC System for Conformity Testing and Certification of Electrical Equipment” “国际电工委员会电工产品合格测试与认证组织”。CB 体系的缩写名称意思是 “Certification Bodies' Scheme” (认证机构体系)。

IECEE CB 体系是电工产品安全测试报告互认的第一个真正的国际体系。各个国家的国家认证机构 (NCB) 之间形成多边协议, 制造商可以凭借一个 NCB 颁发的 CB 测试证书获得 CB 体系的其他成员国的国家认证。

CB 体系基于国际 IEC 标准。如果一些成员国的国家标准还不能完全与 IEC 标准一致, 也允许国家差异的存在, 但应向其他成员公布。CB 体系利用 CB 测试证书来证实产品样品已经成功地通过了适当的测试, 并符合相关的 IEC 要求和有关成员国的要求。

CB 体系的主要目标是促进国际贸易, 其手段是通过推动国家标准与国际标准的统一协调以及产品认证机构的合作, 而使制造商更接近于理想的 “一次测试, 多处适用” 的目标。

#### (1) CB 体系的组织结构

CB 体系由认证管理委员会 (CMC) 进行管理, 并向国际电工委员会 (IEC) 的合格评定委员会 (CAB) 汇报。CAB 批准 CMC 关于改变 CB 体系原则、官员任命、财务和 IECEE 政策方面的建议。CMC 的职责是根据 CB 体系的原则来运行、发展和改进 CB 体系, 决定接受、拒绝和中止成员资格, 决定 CB 体系新的产品类别和标准。

CMC 的成员由来自成员国的代表组成, 包括 NCB 代表、CMC 执行人员 (主席、副主席、秘书和司库), 测试实验室委员会 (CTL) 主席和秘书, IEC 顾问委员会 (如 ACOS)、安全顾问委员会的代表, IEC 的秘书长。

测试实验室委员会 (CTL) 由来自 NCB 和 CB 实验室的代表组成。CTL 负责处理测试程序, 并解释技术要求、测试条件、测试设备以及比对测试。它的主要目标是增强技术可信度和一致性,

这是在 CB 体系内互认试验结果所需要的规则和程序。

目前 CB 体系的成员国有阿根廷、奥地利、澳大利亚、白俄罗斯、比利时、巴西、加拿大、中国、捷克、德国、丹麦、西班牙、芬兰、法国、英国、希腊、匈牙利、印度、爱尔兰、以色列、意大利、日本、韩国、墨西哥、荷兰、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、俄罗斯、罗马尼亚、新加坡、斯洛伐克、斯洛文尼亚、南非、土耳其、乌克兰、美国、前南斯拉夫、瑞士、马来西亚、瑞典、泰国。

### (2) 国家认证机构

国家认证机构 (NCB) 是向电工产品颁发国家范围内认可的合格证书的认证机构。要成为 CB 体系的成员, NCB 的内部质量系统和技术能力必须达到特定的要求。一个 NCB 按其资格可以分为认可 NCB 或者发证/认可 NCB。

① 认可 NCB。一个 NCB 认可其他发证 NCB 颁发的 CB 测试证书和 CB 测试报告, 并以此作为在特定的产品领域和标准范围内颁发其自己的国家证书和标志的依据。认可 NCB 不自动具有颁发 CB 测试证书的权力。

② 发证/认可 NCB。发证 NCB 除了行使认可 NCB 的职能外, 有权在其登记的标准范围内颁发 CB 测试证书。发证/认可 NCB 的认可范围可以大于其发证范围。发证和认可范围都公布在网站上相关的“范围”区域内。

CB 实验室 (CBTL) 是 CB 体系接受的实验室, 它在特定 NCB 的责任之下对一个或多个产品类别进行测试并颁发 CB 测试报告。CB 实验室可以在 CB 体系中与不同的 NCB 联合, 但对于某个确定的产品类别的测试, 只能与一个 NCB 合作进行。

### (3) 测试证书的申请

CB 测试证书是由授权的 NCB 颁发的正式的 CB 体系文件, 其目的是告知其他的 NCB: 已测试的产品样品被认定符合现行要求。CB 测试证书不应该用于广告, 但是允许将已有的 CB 证书作为参考资料。关于 CB 测试证书的申请, 应注意以下几点:

CB 测试证书的申请可以由申请人提交给任一覆盖该产品范围的“发证/认可”NCB。

申请人既可以是制造商, 也可以是得到授权、代表制造商的实体。

申请可以包括一个或多个国家中生产产品的一个或多个工厂。

对于没有 IECEE 成员机构的国家内的申请人、制造商、工厂需要为每份 CB 测试证书支付额外的 150 瑞士法郎费用, 以补偿体系的运行成本。这一费用由受理 CB 测试证书申请的 NCB 收取, 并将打入 IECEE 的账户内。

申请人可以要求 NCB 根据产品销往国的国家差异测试产品。国家差异是某个国家的标准与相应的国际标准之间的差别。所有加入 CB 体系的国家都要将其国家差异提交给 IECEE 秘书处, 并发布在 CB 公报上。

### (4) 产品认证程序

制造商要获得目标市场的产品认证包含以下程序:

① 向目标国家的 NCB 提交 CB 测试证书申请。

② CB 测试报告 (可以包括国家差异)。CB 测试报告是一种标准化的报告, 它以一种逐条清单的形式列举相关 IEC 标准的要求。报告提供要求的所有测试、测量、验证、检查和评价的结果, 这些结果应清楚且无歧义。报告还包含照片、电路图表、图片以及产品描述。根据 CB 体系的规则, CB 测试报告只有在与 CB 测试证书一起提供时才有效。如果一个 NCB 有必要的测试设备和技术能力, 它就可以依据其他国家的国家差异测试和评估产品。这些额

外的测试作为附件附在 CB 测试报告后，通常得到其他认可 NCB 的认可。

③ 当目标市场的 NCB 要求时，向其提供产品样品。要求样品的目的是为了证实产品与最初发证 NCB 测试的产品是否一致，是否已经覆盖了国家差异。

## 2. 澳大利亚的防干扰认证

在澳大利亚，电器产品的防干扰要求由 ACA（Australian Communications Authority，澳大利亚严通信管理局）监控。使用的标准除了澳大利亚和新西兰标准（AS/NZS）之外，还承认 EN、IEC、CISPR 等其他标准。为了限制电磁干扰的影响，澳大利亚从 1999 年 1 月 1 日起，对所有的在标准规定范围内的产品实行电磁干扰强制性要求。部分电子设备防干扰实验项目也必须符合强制性要求，它们是传导干扰、断续干扰（喀呖声）、射频辐射干扰；其余电子设备防干扰试验项目不作强制要求，例如，抗干扰、静电放电、谐波、电压闪烁等。产品经检验后符合相关标准，可以贴上 C-Tick 标志，见图 11-5。任何公司或个人要使用此标志必须向政府主管部门提出申请，得到书面批准后方可使用，而且标志的高度不低于 3 毫米。



图 11-5 C-Tick 标志

C-Tick 标志旁必须按规定标上澳洲供应商的信息，以便 ACA 在市场上抽检产品时能有效地追溯到为该产品防干扰负责的供应商。信息的标识包括四方面的内容：澳洲供应商的注册名称与地址；澳洲公司注册号；由 ACA 颁发给澳洲供应商的号码；产品在澳洲市场上使用的澳洲注册商标。

澳大利亚的电子设备防干扰认证体系把产品划分为三个级别，供应商在销售级别二、级别三产品前，必须在 ACA 注册，申请使用 C-Tick 标志。级别一产品是指对使用无线频谱的设备干扰辐射较低的产品，如手动开关、简单的继电器、单向鼠笼式电感电机、电阻等。对级别一的产品，供应商必须签署符合性声明和提供产品描述书。级别一的产品可以自愿申请 C-Tick 标志，但是供应商在选择使用该标志后，在提供符合性声明和产品描述书的同时，还要提供符合性记录，以证明声明中所描述的产品已符合了相关的防干扰标准。测试地点不作要求，允许内部测试。

级别二产品是指对使用无线频谱的设备干扰辐射较高的产品，如开关电源、电焊机、调光器、大部分家用电器等。供应商除了必须签署符合性声明和提供产品描述书外，还要提供按相关标准进行的测试报告；如果没有相关标准，则需提供技术结构文件，测试地点也不作要求，允许内部测试。

级别三产品是指对使用无线频谱的设备干扰辐射极高的产品，即 CISPR11 与 CISPR22 覆盖的产品。供应商除了必须签署符合性声明和提供产品描述书外，还要提供由认可的测试机构出具的测试报告。同时还要出具由 QMS 认证机构颁发的质量管理体系证书。

向 ACA 申请 C-Tick 标志的申请人只限于在澳大利亚或新西兰的注册公司，因此，中国企业可通过澳大利亚或新西兰的买家，或在澳大利亚及新西兰有分支机构或合作伙伴的认证机构申请，例如，澳大利亚昆士兰的工业关系部可根据德国莱茵 TÜV 的测试报告颁发安全性证书与能耗标签证书，证书在新西兰市场也有效。

## 3. 瑞士 SEV 认证

瑞士 SEV 认证标志如图 11-6 所示。瑞士的 SEV 低电压产品法规规定：进入瑞士市场的电子电气产品需要取得 S-PLUS 标志。此标志包含了产品的安全性，也涵盖了电磁兼容（EMC）的要求。

## 4. 波兰认证

出口到波兰的电子电气产品都必须通过 B 标志认证。如图 11-7 所示为 B 标志。B 标志涵盖产品安全、电磁兼容和卫生要求。



### 5. 俄罗斯认证

根据俄罗斯法律, 商品如果属于强制认证范围, 不论是在俄罗斯生产的, 还是进口的, 都应依据现行的安全规定通过认证并领取俄罗斯国家标准合格证书(缩写 GOST 合格证, 其认证标志如图 11-8 所示)。企业获得俄罗斯 GOST 证书后, 可以在俄设立委托销售或直接销售, 价格也会有较大的优势。一旦通过认证, 在三年有效期内, 每出口一批产品, 领取一份证书复印件, 即可作为有效证明保证出口和上市。

### 6. 美国 FCC 认证

FCC (Federal Communications Commission 美国联邦通信委员会) 于 1934 年建立, 是美国政府的一个独立机构, 直接对国会负责。根据美国联邦通信法规相关部分 (CFR47 部分) 中规定, 凡进入美国的电子类产品都需要进行电磁兼容认证 (一些有关条款特别规定的产品除外), 其中, 比较常见的认证方式有三种: Certification、DOC、Verification。美国 FCC 认证标志如图 11-9 所示。



图 11-6 瑞士 SEV 认证



图 11-7 B 标志



图 11-8 俄罗斯 GOST  
认证标志



图 11-9 美国 FCC  
认证标志

(1) FCC Verification 只要获得了 FCC 认可的实验室均可签发此类报告。主要针对 AV 类产品、有绳电话、普通家用电器、PC 及 PC 周边设备以外的数字设备。认证周期: 一周。

(2) FCC DOC 只有获得了 A2LA (美国实验室认可协会) 或 NVLAP (美国国家实验室认可体系) 授权认可的实验室才能签发此类报告。厂商才能在产品上标贴 FCC 标志, 销往美国。主要产品: IT 产品、PC 及 PC 周边设备。认证周期: 1~2 周。

(3) FCC Certification 可以直接将产品送到美国 TCB (Telecommunication Certification Bodies 电信认证机构) 实验室完成认证。也可将产品送到 FCC 认可的实验室, 在实验室测试、准备资料、完成报告, 再由实验室将测试报告送到 TCB 机构发证。

### 7. 美国 ETL 认证

ETL 美国安全认证由托马斯·爱迪生创建于 1896 年, 目前已获得北美各大零售商及制造商的广泛认可和接受。

(1) ETL 检验标志 (见图 11-10) 任何电气、机械或机电产品只要带有 ETL 检验标志就表明它是经过测试符合相关的业界标准。每个行业都有不同的测试标准, 所以对特定产品的要求一定要向专业人员咨询。ETL 检验标志在电缆产品中广泛应用, 贴上该标志的产品表明通过了有关测试。

(2) ETL 列名标志 (见图 11-11) 任何电气、机械或机电产品只要带有 ETL 标志就表明它是经过测试符合相关的产品安全标准, 而且也代表着生产商同意接收严格的定期检查, 以保证产品品质的一致性。右下方的 “us” 表示适用于美国, 左下方的 “c” 表示适用于加拿大, 同时具有 “us” 和 “c” 则在两个国家都适用。

### 8. 美国 UL 认证 (见图 11-12)

UL 是美国安全检定实验室公司 (Underwriters Laboratories Inc) 的缩写。它成立于 1894 年, 是一家非以营利为目的的产品安全测试认证机构。全球有 50 多间实验室, 约有 6 000 员工。

每年有成千上万的产品通过 UL 认证并使用 UL 标志，目前 UL 共有近 800 多套标准，其中 75% 被美国国家标准化组织 ANSI（American National Standard Institute）采用。目前，UL 在美国本土有五个实验室，总部设在芝加哥北部的 Northbrook 镇，同时在中国台湾和香港分别设立了相应的实验室。



图 11-10 ETL 检验标志



图 11-11 ETL 列名标志



图 11-12 美国 UL 认证

UL 安全认证分三种：认可，列名，分级。认可元件服务是测试零部件或非成品，这些元件将会用在 UL 列名产品中。产品上的 UL 列名标志，代表生产商让 UL 按美国认可的安全标准测试了样品，样品不会引起火灾、漏电及有关危险。UL 分级产品包括工业或商业用产品，测试时都有指定性质，包括易燃性、危险情况性能。

9. 韩国 EMC 及 MIC 认证

在韩国涉及 EMC 方面的法规有电气安全控制法、无线电管理法、医药事务法，这三个法分别由三个部门来管理，即商业能源管理部（MOCIE）、信息及通信部（MIC）、韩国卫生部。具体情况见表 11-18。

表 11-18 韩国 EMC 及 MIC 认证

相关政府部门	商业及能源部（MOCIE）	信息及通信部（MIC）	韩国卫生部（HOHW）
认证机构	韩国检测实验室（KTL）及其他	无线电研究实验室（RRL）	韩国食品及药品管理局（KFDA）
相关法律	电气安全控制法	无线电管理法	医药事务法
适用产品	电气产品	计算机及外设终端设备	医疗设备
批准程序	安全认证（包含 EMC）	EMC 批准/注册	制造商和进口商许可
EMC 技术标准	EMI 方面等效 CISPR;EMS 等效 IEC61000-6	EMI 方面等效 CISPR22;EMS 等效 IEC61000-6	EMI 方面等效 CISPR11; EMS 等效 IEC61000-6
检测实验室	韩国检测实验室（KTL）及其他	韩国检测实验室（KTL）及其他	韩国检测实验室（KTL）

韩国信息通信部（MIC）对电信产品负责管理，它授权无线电研究实验室（RRL）为其认证机构，对产品实施具体的认证工作，其认证标志是：MIC Mark。MIC 辐射要求规定了两种分级：A 级设备用于商业目的；B 级设备用于非商业目的。

10. 阿根廷认证简介

为保障公众安全使用电器，阿根廷要求上市销售的电气产品必须满足相应的安规要求。阿根廷于 1998 年 2 月 16 日颁布决议，所有在阿根廷市场上销售的产品必须获得国家认证标志。经过认证的产品可使用 S 标志（见图 11-13）。



图 11-13 “S”标志

认证的第一步是选择合适的认证机构及实验室。IRAM 是阿根廷国内一家与多国认证机构有合作关系的认证机构。受测样机按 220V/50Hz 准备的采用满足阿根廷标准 IRAM 2073 要求的电源线插头。

11. 其他国际防干扰认证标志

CE 标志是产品进入欧盟境内销售的通行证，表示产品符合一项或多项欧洲市场现行指令对安全、健康及环境的基本要求。

GS 标志是德国认可的安全标志，表示该产品被认可的机构测试证明符合操作的安全要求。

VDE 是德国著名的测试机构，直接参与德国国家标准的制定。

JIS 标志是日本标准化组织对经指定部门检验合格的电器产品、纺织品颁发的产品标志。

法国的 NF 标志可单独使用于电器及非电器类产品，也可与其他标志或字母的图案共同使用，主要指安全标准要求 and 效能特征。

CSA 是加拿大标准委员会颁发给质量合格产品的认证标志。有关进口商品必须清楚标注以上标志，它代表该商品的安全质量认证，保证了商品质量的可靠性。

### 11.2.2.3 中国的防干扰认证

#### 1. 发展概况

中国 1978 年恢复国际标准化组织的成员国地位后，就按照国家规范建立了中国强制性产品认证制度，并开展了相关的工作。1984 年 4 月国务院颁布了《工业产品生产许可证试行条例》。1991 年 5 月 7 日，国务院发布的《中华人民共和国产品质量认证管理条例》，对 107 种国内产品实施了产品安全认证；对 104 种进口商品实施了进口商品安全质量许可证制度，这项制度涉及 60 多个国家和地区。这些产品认证制度对提高我国产品质量水平和在国际市场上的竞争力，维护国家经济利益、经济安全，保护环境等方面起到了积极的作用。

2001 年成立的国家质检总局和国家认监委，建立了国家强制性产品认证制度。2002 年 1 月 1 日起发布施行《进口许可制度民用商品入境验证管理办法》；2002 年 2 月 11 日国务院办公厅发布《关于加强认证认可工作的通知》；国家认证认可监督管理委员会、国家质量监督检验检疫总局、国家工商行政管理总局、对外贸易经济合作部于 2002 年 4 月 2 日联合发布了《认证机构及认证培训、咨询机构审批登记与监督管理办法》；2002 年 5 月 1 日起发布施行《强制性产品认证管理规定》、《强制性产品认证标志管理办法》和《国家认可机构监督管理办法》；2002 年 6 月 1 日起发布施行《工业产品生产许可证管理办法》。2003 年 5 月 1 日起，凡列入强制性产品认证目录内的产品，没有获得指定认证机构的认证证书，没有按规定加施认证标志，一律不得进口、不得出厂销售和在经营服务场所使用。

我国强制性产品认证制度，是依据《中华人民共和国产品质量法》、《中华人民共和国进出口商品检验法》、《中华人民共和国标准化法》、《中华人民共和国进出口商品检验法实施条例》、《中华人民共和国产品质量认证管理条例》等法律、法规建立的具有以下特点：国家公布统一的目录，确定统一使用的国家标准、技术规则和实施程序，制定统一的标志，规定统一的收费标准。凡列入目录内的产品，必须经国家指定的认证机构认证合格，取得相关证书并加施认证标志后，才能出厂、进口、销售和在经营服务场所使用。

CCIB 标志，是中国商检标志。只要是正规渠道进入我国市场进行销售的家电商品必须实施安全质量检查，经商检部门审查合格后允许加贴“CCIB”标志，以证明该进口商品质量安全、可靠。

#### 2. 防干扰认证的组织管理

##### (1) 组织管理

国家认证认可监督管理委员会，是国务院授权的负责全国强制性产品认证工作的机构，在强制性产品认证制度建立和实施中，其职能主要是拟定、调整《强制性产品认证目录》并与国家质检总局共同对外发布；拟定和发布《目录》内产品认证实施规则；制定并发布认证标志，确定强制性产品认证证书的要求；指定承担认证任务的认证机构、检测机构和检查机构；指导地方质检机构对强制性产品认证违法行为的查处等。

指定认证机构在指定的工作范围内按照产品认证实施规则开展认证工作；对获得认证的产

品,颁发认证证书,并对认证结果负责;对获得认证的产品进行跟踪检查;受理有关的认证投诉、申诉工作;依法暂停、注销和撤销认证证书。地方质检部门对列入强制性认证产品目录内的产品实施监督。

### (2) 认证制度的实施

产品认证模式依据产品的性能,对人体健康、环境和公共安全等方面可能产生的危害程度,产品的生命周期特性等综合因素,按照科学、便利等原则予以确定。《目录》中产品认证适用以下单一的认证模式或者若干认证模式的组合,具体包括设计鉴定;型式试验;制造现场抽取样品检测或者检查;市场抽样检测或者检查;企业质量保证体系审核;获得认证的后续跟踪检查。

《目录》中产品的生产者、销售者和进口商可以作为申请人,向指定认证机构提交认证申请书、必要的技术文件和样品,缴纳认证费用。申请人为销售者、进口商时,应当向指定认证机构同时提交销售者和生产者或者进口商和生产者订立的相关合同副本;申请人委托他人申请《目录》中产品认证的,应当与受委托人订立认证、检测、检查和跟踪检查等事项的合同,受委托人应当同时向指定认证机构提交委托书、委托合同的副本和其他相关合同的副本。

指定认证机构负责受理申请人的认证申请,根据认证实施规则的规定,安排型式试验、工厂审查、抽样检测等活动,做出认证决定,向获得认证的产品颁发认证证书。指定认证机构在一般情况下,应当自受理申请人认证申请的 90 日内,做出认证决定并通知申请人。

认证标志的名称为“中国强制认证”(英文名称为“China Compulsory Certification”,英文缩写为“CCC”,也可简称为“3C”标志。),认证标志是《目录》中产品准许其出厂销售、进口和使用的证明标记。标志规格分标准规格和非标准规格两类。标准规格按尺寸分为 5 种(60mm, 45mm, 30mm, 15mm, 8mm),颜色均为黑色、白背景。非标准规格可自行设计经批准使用。图 11-14 为电磁兼容 3C 认证标志。



图 11-14 电磁兼容 3C 认证标志

指定认证机构应当按照具体产品认证实施规则的规定,对其颁发认证证书的产品及其生产厂(场)实施跟踪检查。申请人和认证证书持有人对指定认证机构的认证决定有异议的,可以向做出认证决定的认证机构提出投诉、申诉,对认证机构处理结果仍有异议的,可以向国家认证认可监督管理委员会申诉。

### (3) 认证的监督管理

指定认证机构和为其提供服务的指定检测机构、检查机构应当接受国家认证认可监督管理委员会的监督管理;保证认证结果的准确,承担相应的法律责任;定期向国家认证认可监督管理委员会报送《目录》中产品的认证信息;保守认证产品的商业秘密和技术秘密,不得非法占有他人的科技成果;未经许可,不得向其他认证机构转让认证受理权、认证决定权、检测权和检查权;不得从事认证工作职责范围内的咨询和产品开发工作;不得擅自与其他机构或者组织签署双边或者多边互认《目录》中产品的认证、检测和检查结果的协议。

获得《目录》中产品认证的生产者、销售者、进口商应当保证提供实施认证工作的必要条件;保证获得认证的产品持续符合相关的国家标准和技术规则;保证销售、进口的《目录》中产品为获得认证的产品;按照规定对获得认证的产品加施认证标志;不得利用认证证书和认证标志误导消费者;不得转让、买卖认证证书和认证标志或者部分出示、部分复印认证证书。接受各地质检行政部门和指定认证机构的监督检查或者跟踪检查。

### 3. 防干扰认证的机构

为保证新的强制性产品认证制度的顺利实施,国家认监委先后指定 9 家认证机构和 76 家检

测机构承担第一批强制产品认证的认证和检测工作。中国电磁兼容认证中心是国家质量监督检验检疫总局批准成立的第三方产品认证机构，英文名称为“China Certification Center for Electromagnetic Compatibility”，简称 CEMC。根据国家认证认可监督管理委员会 2002 年第 4 号公告，中国电磁兼容认证中心为指定承担强制性产品认证（3C 认证）工作的认证机构，自 2002 年 5 月 1 日起，受理强制性产品认证（3C 认证）的申请。授权范围见表 11-19。

表 11-19 中国电磁兼容认证中心授权范围

CNCA-01C-001	电线组件	CNCA-01C-014	电动工具
CNCA-01C-002	电线电缆	CNCA-01C-016	家用和类似用途设备
CNCA-01C-003	家用及类似用途插头插座	CNCA-01C-017	音视频设备
CNCA-01C-004	家用及类似用途固定式电器装置的开关	CNCA-01C-018	声音和电视信号的电缆分配系统设备与部件
CNCA-01C-005	工业用插头插座和耦合器	CNCA-01C-019	卫星电视广播接收机
CNCA-01C-006	家用及类似用途器具耦合器	CNCA-01C-020	信息技术设备
CNCA-01C-007	热熔断体	CNCA-01C-021	金融及贸易结算电子设备
CNCA-01C-008	家用及类似用途固定式电器装置电器附件外壳	CNCA-01C-022	照明电器
CNCA-01C-009	小型熔断器的管状熔断体	CNCA-07C-031	电信终端设备
CNCA-01C-013	小功率电动机		

#### 4. 强制认证的部分电子设备

(1) 电线电缆 电线组件、矿用橡胶套软电缆、交流额定电压 3kV 及以下铁路机车车辆用电线电缆、额定电压 450/750V 及以下橡皮绝缘电线电缆、额定电压 450/750V 及以下聚氯乙烯绝缘电线电缆。

(2) 电路开关及保护或连接用电器装置 器具耦合器（家用和类似用途、工业用）、插头插座（家用和类似用途、工业用）、热熔断体、小型熔断器的管状熔断体、家用和类似用途固定式电气装置的开关、家用和类似用途固定式电气装置电器附件外壳。

(3) 低压电器 漏电保护器、断路器（含 RCCB、RCBO、MCB）、熔断器、低压开关（隔离器、隔离开关、熔断器组合电器）、其他电路保护装置（保护器类：限流器、电路保护装置、过流保护器、热保护器、过载继电器、低压机电式接触器、电动机启动器）、继电器（36V<电压<1000V）、其他开关（电器开关、真空开关、压力开关、接近开关、脚踏开关、热敏开关、液位开关、按钮开关、限位开关、微动开关、倒顺开关、温度开关、行程开关、转换开关、自动转换开关、刀开关）、其他装置（接触器、电动机启动器、信号灯、辅助触头组件、主令控制器、交流半导体电动机控制器和启动器）、低压成套开关设备。

#### (4) 小功率电动机

(5) 电动工具 电钻（含冲击电钻）、电动螺丝刀和冲击扳手、电动砂轮机、砂光机、圆锯、电锤（含电镐）、不易燃液体电喷枪、电剪刀（含双刃电剪刀、电冲剪）、攻丝机、往复锯（含曲线锯、刀锯）、插入式混凝土振动器、电链锯、电刨、电动修枝剪和电动草剪、电木铣和修边机、电动石材切割机（含大理石切割机）。

(6) 电焊机 小型交流弧焊机、交流弧焊机、直流弧焊机、TIG 弧焊机、MIG/MAG 弧焊机、埋弧焊机、等离子弧切割机、等离子弧焊机、弧焊变压器防触电装置、焊接电缆耦合装置、电阻焊机、焊机送丝装置、TIG 焊焊炬、MIG/MAG 焊焊枪、电焊钳。

(7) 家用和类似用途设备 家用电冰箱和食品冷冻箱（有效容积在 500 立升以下，家用或

类似用途的有或无冷冻食品储藏室的电冰箱、冷冻食品储藏箱和食品冷冻箱及它们的组合)、电风扇(单相交流和直流家用和类似用途的电风扇)、空调器(制冷量不超过 21 000 大卡/小时的家用及类似用途的空调器)、电动机—压缩机(输入功率在 5kW 以下的家用和类似用途空调和制冷装置所用密闭式(全封闭型、半封闭型)电动机-压缩机)、家用电动洗衣机(带或不带水加热装置、脱水装置或干衣装置的洗涤衣物的电动洗衣机)、电热水器(把水加热至沸点以下的固定的储水式和快热式电热水器)、室内加热器(家用和类似用途的辐射式加热器、板状加热器、充液式加热器、风扇式加热器、对流式加热器、管状加热器)、真空吸尘器(具有吸除干燥灰尘或液体的作用,由串激整流子电动机或直流电动机驱动的真空气吸尘器)、皮肤和毛发护理器具(用作人或动物皮肤或毛发护理并带有电热元件的电器)、电熨斗(家用和类似用途的干式电熨斗和湿式(蒸汽)电熨斗)、电磁灶(家用和类似用途的采用电磁能加热的灶具,它可以包含一个或多个电磁加热元件)、电烤箱(包括额定容积不超过 10 升的家用和类似用途的电烤箱、面包烘烤器、华夫烙饼模和类似器具)、电动食品加工器具(家用电动食品加工器和类似用途的多功能食品加工器)、微波炉(使用频率在 300MHz 以上的一个或多个 I.S.M.波段的电磁能量来加热食物和饮料的家用器具,它可带有着色功能和蒸汽功能)、电灶、灶台、烤炉和类似器具(包括家用电灶、分离式固定烤炉、灶台、台式电灶、电灶的灶头、烤架和烤盘及内装式烤炉、烤架)、吸油烟机(安装在家用烹调器具和炉灶的上部,带有风扇、电灯和控制调节器之类用于抽吸排除厨房中油烟的家用电器)、液体加热器和冷热饮水机、电饭锅(采用电热元件加热的自动保温式或定时式电饭锅)。

(8) 音视频设备类(不包括广播级音响设备和汽车音响设备) 总输出功率在 500W(有效值)以下的单扬声器和多扬声器有源音箱、音频功率放大器、调谐器、各种广播波段的收音机、各类载体形式的音视频录制、播放及处理设备(包括各类光盘磁带等载体形式)、及以上设备的组合,为音视频设备配套的电源适配器、各种成像方式的彩色电视接收机、监视器(不包括汽车用电视接收机)、黑白电视接收机及其他单色的电视接收机、显像(示)管、录像机、卫星电视广播接收机、电子琴、天线放大器、声音和电视信号的电缆分配系统设备与部件。

(9) 信息技术设备 微型计算机、便携式计算机、与计算机连用的显示设备、与计算机连用的打印设备、多用途打印复印机、扫描仪、计算机内置电源及电源适配器充电器、电脑游戏机、学习机、复印机、服务器、金融及贸易结算电子设备。

(10) 照明设备(不包括电压低于 36V 的照明设备) 灯具、镇流器。

(11) 电信终端设备 调制解调器(音频调制解调器、基带调制解调器、DSL 调制解调器,含卡)、传真机(传真机、电话语音传真卡、多功能传真一体机)、固定电话终端(普通电话机、主叫号码显示电话机、卡式管理电话机、录音电话机、投币电话机、智能卡式电话机、IC 卡公用电话机、免提电话机、数字电话机、电话机附加装置)、无绳电话终端(模拟无绳电话机、数字无绳电话机)、集团电话(集团电话、电话会议总机)、移动用户终端(模拟移动电话机、GSM 数字蜂窝移动台(手持机和其他终端设备)、CDMA 数字蜂窝移动台(手持机和其他终端设备))、ISDN 终端、终端适配器(卡)、数据终端(存储转发传真/语音卡、POS 终端、接口转换器、网络集线器、其他数据终端)、多媒体终端(可视电话、会议电视终端、信息点播终端、其他多媒体终端)。

(12) 机动车辆及安全附件 汽车(在公路及城市道路上行驶的 M、N、O 类车辆)、摩托车、汽车摩托车零部件(汽车安全带、摩托车发动机)。

(13) 医疗器械产品 医用 X 射线诊断设备、血液透析装置、空心纤维透析器、血液净化装

置的体外循环管道、心电图机、植入式心脏起搏器、人工心肺机。

(14) 消防产品 火灾报警设备(点型感烟火灾报警探测器、点型感温火灾报警探测器、火灾报警控制器、消防联动控制设备、手动火灾报警按钮)、消防水带、喷水灭火设备(洒水喷头、湿式报警阀、水流指示器、消防用压力开关)。

(15) 安全技术防范产品 入侵探测器(室内用微波多普勒探测器、主动红外入侵探测器、室内用被动红外探测器、微波与被动红外复合入侵探测器)

#### 5. 3C 认证与质量管理体系认证的异、同点

(1) 都是为了强化企业管理 现代化的企业管理涉及许多方面,市场竞争和法律法规都要求企业不断改进它们的管理体系,确保产品的适用性和安全性,承担相应的产品责任。

(2) 都是为了适应我国加入 WTO 的新形势 取得强制性产品认证证书和标志是国际贸易中市场准入的条件之一,有些国家还把取得管理体系认证证书作为合格供应商的条件之一。

(3) 均可纳入合格评定体系它们都有客观评定依据,都需要得到外界的承认,获证后都要进行监督。

(4) 3C 认证是国家实施的强制性产品认证制定;质量管理体系认证是国际性的自愿认证制定。

(5) 3C 认证的对象是列入《强制性认证产品目录》内的产品;质量管理体系认证的对象是任何组织,没有什么限制。

(6) 3C 认证的依据是国家的法律法规和相应的产品检测标准;质量管理体系认证的依据是 ISO9001:2000 和组织的管理体系文件。

(7) 对于生产《强认目录》内产品的组织来说,取得 3C 认证证书和标志是通过质量管理体系认证的必要条件之一,而已通过质量管理体系认证的组织也为 3C 认证创造了方便条件,这是因为二者在进行工厂审查和审核时有许多共同的要求。

## 第 12 章 电子设备整机结构设计

### 12.1 电子设备造型设计

电子设备造型设计,是以产品设计为主要对象,涉及科学和美学、技术与艺术等诸多领域,处在自然科学和社会科学、工程技术和文化艺术的交叉点上的一门学科,是现代工业设计领域中的重要分支,是现代电子产品设计不可缺少的基本理论之一。

#### 12.1.1 电子设备造型设计基础

工业造型设计将先进的科学技术和现代的审美观念有机地结合起来,寻求实现“人机(产品)-环境”的和谐、统一与协调。工业造型设计既不是纯工程技术设计,也不是纯艺术设计,它是一种融科学的理智与艺术的情感、技术美与艺术美为一体的创造性活动。因此,正确理解和掌握工业造型设计的概念和知识,对于当代工程技术设计人员来说,创造出造型美观、经济实用的电子设备产品进入国际市场,是十分必要的。

在国际上,“工业设计”有广义和狭义两种概念。广义的工业设计包括以下内容:

(1) 工业设备、电子设备、交通运输设备、商业及服务设备、专用设备、物质生活消费品等工业产品的造型设计。

(2) 包装装潢、广告、海报、招贴等视觉设计。

(3) 工作环境、生活环境的环境规划与设计。

狭义的工业设计即对产品的造型设计,也称“工业造型设计”。

国际工业设计协会给工业设计作了如下的定义:“就批量生产的工业产品而言,凭籍训练、技术知识、经验及视觉感受而赋予材料、构造、形态、色彩、表面加工以及装饰以新的品质和资格”。因此,工业设计是一种创造性活动,它不仅要确定工业产品的外现质量,还必须同时考虑合理的结构、功能与材料。

很显然,工业造型设计就是对工业产品进行结构、材料、工艺性、功能性、合理性、经济性、审美性等的推敲与设计。

工业造型设计是一门横跨工程技术、人机工程学、价值工程、生理学、心理学、美学、艺术、商品经济、市场营销等学科的综合性学科,具有科学性、实用性、艺术性、时代性的显着特征。随着现代工业的飞速发展,它日益受到普遍重视,造型设计的理论已是工程技术人员必须掌握的知识之一。

##### 12.1.1.1 电子设备造型设计的原则和特点

###### 1. 基本设计原则

###### (1) 实用

实用是指产品具备先进和完善的各种功能,并保证产品物质功能得到最大限度的发挥。产品



的用途决定产品的物质功能,产品的物质功能决定产品的形态,因此产品的形态设计必须服从于产品的物质功能。“实用”是产品设计的主要目的,应该体现产品功能设计的科学性和先进性、操作的合理性和使用的可靠性等。

造型设计必须保证产品的物质功能和工作性能。物质功能就是产品造型的用途和功用。工作性能是指产品的机械性能、物理性能、电气性能、化学性能等,即该产品在准确、稳定、牢固耐久、高速、安全等各方面所能达到的程度。产品的造型必须使外观形式与功能及工作性能相适应,和谐而统一。

产品的物质功能是通过人的使用来体现的,这就要求设备操作合理、使用可靠、使用方便、省力高效;还必须考虑产品使用的民族、地区、工作对象和风俗习惯等。这样才能使造型受到人们的欢迎,提高实用性。

### (2) 美观

即造型美,是产品整体在形式上、结构上、材质上、工艺上、装饰上和色彩上体现出来的全部美感的综合。它还包括时代感和传统的民族风格特点。造型设计师正是运用美学原理和法则,掌握新工艺和材质特征以及人们审美心理的变化,创造出新颖、雅致的产品来。

### (3) 经济

经济反映产品的功能和生产成本之间的价值。在造型活动中,除运用价值分析方法努力降低成本外,对产品按标准化、系列化、通用化的要求进行设计,使空间的安排、体块的组织、材料的选用,达到紧凑、简洁准确,以最少的人力、物力、财力和时间来求得最大的效益。

“单纯的追求美,而不考虑经济”或“只考虑经济,而放弃造型美”都是错误的。“经济”的含义,即价廉物美。只要物尽其用、工艺合理、避免浪费,就是符合经济原则的。例如,一台高精度的仪表,使用了贵重材料和精细的加工工艺,既有良好的工作性能,又有产生美感的造型,就可以说是经济的。

实用、美观、经济三者相辅相成,实用是首位,美观处于从属地位,经济是前两者的约束条件。造型设计就是要处理好实用与美观、美观与经济、内在质量与外观质量、继承和创新等对立的统一,设计出质量精良、造型美观的好产品来。

## 2. 设计特点

工业产品的艺术造型设计既不是纯工程技术设计,也不是单纯的美术设计,它是工程技术与美术艺术的密切结合,以产品设计为主要对象,重点研究与产品造型有关的工程技术问题,与造型形式美的密切结合问题和造型设计构思、表现方法与技能问题。它探讨如何应用造型设计原理,达到产品的科学性与艺术性的高度统一,研究如何应用造型设计原则,处理特定条件下各种产品的结构、功能、材料、工艺和市场等方面与造型的关系,并且创造性地将这些因素协调地表现在产品的结构和造型上,创造出既有物质功能又具有精神功能,而且具有时代感的现代工业产品。

然而,工程设计是着重于产品功能原理,实现功能的结构设计和实现结构的工艺设计等一系列以逻辑思维与技术规范为标准的技术性设计。单纯的美术设计是注重运用艺术法则和个人审美观念的表现,着重于形式美的表现与技巧表现,主要进行形象思维的纯艺术性设计。

艺术造型设计是工程技术与美术艺术的结合。具体表现在在产品的设计中必须应用工程设计的有关知识、技术,合理地解决产品造型形态艺术表现的有关技术问题;又必须应用艺术表现法则和造型设计构思原理,部分应用美术设计技能,共同为产品的造型设计服务。由此可见,两者的关系甚为密切。

产品的艺术造型设计不是产品已生产制造出来之后的纯美化工作,而是与技术设计的各个设

计步骤同步配合进行的一项创造性技术工作。它贯穿于产品设计、制造的全过程，是产品设计的重要组成部分，是不可缺少的现代设计方法之一。只有将艺术造型设计的程序同产品设计工作中的其他技术设计进程相协调，才能保证产品设计取得良好的效果。

#### 12.1.1.2 电子设备造型设计的步骤

(1) 明确设计任务、构思准备 在造型设计一开始就应充分了解设计任务的目的和要求，它是属新产品开发还是老产品改型设计，对产品的新功能要求、技术要求、使用要求、环境要求以及技术参数等方面均应全面了解，同时，要对同类产品的国内外造型资料进行市场调查和用户调查，为造型设计构思提供依据。

(2) 构思方案 在前一阶段有充分准备的情况下，配合技术设计的初步方案即可对产品的造型进行多个初步方案的构思，可采用各类造型图和粗略的形体模型等方法，来表现各种构思方案。为初步方案的比较提供较形象化的依据。

(3) 方案初评 在初步构思方案的基础上，应聘请技术设计、造型设计及各方面人员，按照产品的总体要求，依据选型设计原理与原则，进行多方案的分析比较，评定各构思方案的优缺点，并从实际生产条件和各方面可能实现的各种技术条件，选择最合理的造型方案作为基本方案。

(4) 方案设计 依据选出的基本方案，再进行更为细致、具体的艺术造型设计，绘制正式的造型预想效果图。按实际需要，还可按一定的尺度、预想的线型、形体、装饰等方面的要求，制作产品的立体模型来表现造型设计方案。与此同时，写出造型设计分析报告，论证设计思想和方案的合理性与优越性。为了形象化和具体化，还可制作设计方案展示图，以供方案审定时使用。

(5) 方案审定 最后决定采用的造型设计方案，必须经过正式审定。需聘请产品设计、制造、质量检查等有关部门的技术负责人和主管技术部门的专家和领导，以及其他方面的专家，共同审定造型设计方案是否达到预期的目的要求。经审定的造型设计方案将作为产品技术设计（整机、部件、零件等）造型方面的依据，一般不允许有较大的改动，并且也作为产品试制与鉴定最终造型效果的依据。

(6) 产品试制 在产品试制过程中，对于产品造型方面的要求，不论是在零部件加工，还是在工艺选择、色彩涂装、装饰等方面，均应严格按照已定方案实施。

(7) 产品造型的再改进 产品试制成功后，对于产品的造型款式及其效果，应列为产品的鉴定项目。产品的艺术造型鉴定应依据一定的标准，经数位专家评定，对于评审提出的造型缺陷，应进一步予以修改提高，使产品造型更加完美，为产品批量生产确定最终的造型款式。

#### 12.1.1.3 造型设计相关美学原理

研究造型美学规律之前，必须首先弄清形式美规律和审美观念这两个不同的概念。所谓形式美规律，就是指造型形式诸要素间的必然的联系，它是指导一切造型形式构成的永久性原则。审美观是领会事物或艺术品的美的观念，它往往受民族文化、地理条件、生活方式、年龄、个人爱好和时代变化等因素的影响，是有相对性的。各种造型形式无论是受何种审美观念的影响，它们都应当符合形式美普遍规律的要求。

艺术造型设计中为获得产品美感的表现，必须依据形式美法则结合产品自身的功能特点来加以具体创造，设计师通过产品的线、形、色、质等造型要素来创造新颖、美观的形象。产品艺术造型设计的美学原则概括为以下几个方面。

### 1. 比例

比例是指造型局部之间或局部与整体之间的匀称关系。在造型设计中常用的比例有：黄金比例、整数比、相加级数比、等差级数比等。这些比例的形式体现了匀称、节奏、渐变和明快等造型特征。

黄金比是世界上公认的优美比例，亦称黄金分割。它是指把一线段分割成两段，使分割后的长段为全长的0.618倍，这就是著名的黄金比。

随着文明程度的提高，人们的审美情趣也不断变化，导致新的比例关系产生。如宽银幕在视觉上造成新效应，使人眼在欣赏时略作左右移动，符合人眼观察周围环境的实际情况，形成视觉真实感，所以被人们接受和欢迎。

### 2. 尺度

工业产品的尺度是指其整体和局部构件与人之间相适应的大小比例关系。尺度与产品的物质功能有关，如机器上的操纵手柄、旋钮等，其尺度必须较为固定，因为它们必须与人发生关系，它们的设计要与人的生理、心理特点相适应，由此确定它们的尺度。如果单纯考虑与机器的比例关系，使这些操纵件尺度过大或过小，势必造成操作不准确或失误。

产品尺度可在产品物质功能允许范围内调整。良好的比例关系和正确的尺度，对于一件工业产品来说都是重要的，但首先解决的应该是体现物质功能的尺度问题。所以，在造型设计中，一般先设计尺度，然后再推敲比例关系，当两者矛盾较大时，尺度应在允许的范围内作适当调整。例如，男表与女表在尺度上的差别是被限制在一定范围内的，这种限制范围是表的物质功能（观看时间）所允许的。如果因女表做得太小而看不清时间，或男表做得太大而无法带在手腕上，都是失去了手表的物质功能。又如微型汽车的车门，按照车身造型比例设计会造成车门尺寸过小，乘员根本无法进出。所以，在造型设计中，比例与尺度应综合考虑、分析和研究。

### 3. 均衡

美的造型应给人以各部分形体间平衡、安定的感觉。均衡是指造型各部分之间前后、左右的相对轻重平衡关系，是力和重心两者矛盾统一所产生的形态。一般而论，凡一组对立存在的东西，只要它们能够安定地合在一起，构成完整且统一的整体，那么这种造型就是均衡的。均衡有两种形式：

（1）对称均衡 它将相同的形状、相同的体积、相同的纹样等距离地配置在对称面、对称轴或特定的支点两侧，具有简单、明了、匀称、庄严、整齐的感觉，其缺点是易使人感到单调。

（2）不对称均衡 均衡中心的每一边在形式上虽不相等，但在美学意义上都有着某种等同，视觉上感到平衡，这就是不对称均衡。不对称均衡是积极的均衡，是一种富于变化的、生动的现代造型感觉。

在电子设备的造型设计中，不仅要注意大形体之间的均衡感，还要注意一些结构细节，如装饰条、面板、色彩等对均衡感的影响。

### 4. 稳定

稳定是指造型整体上、下之间的轻重关系。稳定的造型给人以轻松感，不稳定的造型则给人以紧张。

电子设备造型的稳定，有实际效用的稳定和视觉审美的稳定两种。实际稳定是指产品实际质量的重心符合稳定条件所达到的稳定；视觉稳定则指人的心理对形体外部形态关系的稳定感受。造型设计时，为取得良好的稳定感，需同时对上述两种稳定进行考虑。常用的增强产品稳定性的方法有：

（1）形态处理。使产品从底部向上逐渐递减，形成梯形造型，从而降低重心，取得稳定感。

(2) 增加、扩大支承面或底座。

(3) 利用色彩对比。增强产品下部色彩的浓度, 从而增加产品下部的重量感, 使稳定感加强。

(4) 利用材料及表面处理工艺所赋予的不同质感。利用材料的不同、表面处理方法的的不同, 使产品上部光洁明亮, 下部粗糙深暗, 从而增加稳定感。

(5) 利用装饰手段。利用面板、标志等装饰手段也可加强产品下部的重量感, 从而获得稳定感。

### 5. 统一

统一就是将性质相同或类似的造型要素并置在一起, 造成一种一致性或一致趋势的感觉。为了在变化中增强秩序感, 必须在变化中求统一。常用的方法有以下几种:

(1) 以分明的主从关系求统一。主要部分必须处于突出的地位, 从属部分则作陪衬, 这样就可使主、从部分组合成一个有机、和谐的统一整体。

(2) 运用线条和形状的协调关系求统一。

(3) 用色彩的协调求统一。

### 6. 变化

所谓变化, 就是特质性相异的造型要素并置在一起, 造成一种明显的对比感觉、为了在统一中增强活跃、生动的美感, 必须在统一中求变化。常用的手法有:

(1) 加强对比 造型时常通过体量的大小、形状、轻重、虚实, 线条的曲直、疏密, 色彩的冷暖、明暗, 质感的粗细、优劣等方面的对比来求得统一中的变化, 从而产生自然、生动的视觉效果。

(2) 节奏变化 图 12-1 为一电子设备的面板造型, 面板上以横线条构成统一, 而旋钮排列得有疏有密, 形成节奏变化。旋钮有大有小, 在重复因素中加强了变化, 给人以统一协调、变化自然的感觉。

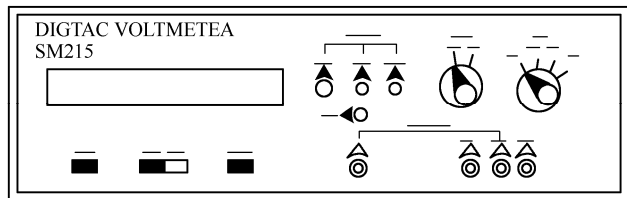


图 12-1 有节奏的旋钮布置

### 7. 重点

重点突出是指造型设计中对造型物主要部分加以重点表现和刻画。组成产品的各个部分, 是构成造型体必不可少的组成部分。但是, 就其功能作用、结构方式、繁简和所处的部位来说又是各不相同的。因此, 造型中可运用重点突出的方法来加强造型的变化, 对产品的重点或中心部分、视觉中心的部分, 对于其线型、体量、色彩等方面都可作比较细致的艺术处理, 而对次要部分只在符合整体统一的原则基础上, 作一般的造型处理, 起烘托或陪衬主要部分的作用, 使主要部分突出、生动和自然。在有主有次的处理方式下, 造型各部分的艺术效果自然形成不同的差别, 反映在造型的形态上, 也就形成了统一、协调下的变化。

突出主体的方法主要有: 运用形体对比来突出主体; 运用色彩、材质的对比来突出主体; 运用精细或特殊的加工工艺, 获得特别的面饰效果来突出主体; 采用特殊的外观件和装饰件来强调重点; 利用造型中的方向性和透视感等因素, 引导人们的视线集中于主体。

重点处理是造型中常用的方法,可以增强造型物的艺术感染力,突出产品的功能特点,丰富造型形象的变化;否则会使造型形象单调乏味。但是,过多的重点处理则会造成视觉混乱或结构不合理,增加造价,以上问题在造型设计中必须协调合理地处理好。

## 12.1.2 电子设备的形态设计

### 12.1.2.1 产品形态特征及类别

工业产品是具有三维空间的立体,它的造型是将功能、结构等物质因素和艺术因素有机组合的空间形象。产品造型的实质是依据一定的科学技术原理和美学原则实现产品的立体造型。

各种工业产品尽管功能、用途不同,但构成造型体形态的基本元素都是具有相同性质的各类几何体。由此可见,大多数工业产品的形态是由简单的几何形体采取不同的方式构成的,这一特征是工业产品造型形态表现的主流。其原因是由于几何形态构成的造型最适合工业产品常用材料的造型,如铸造用金属、金属板材、型材、工程塑料等。这些材料适合机械化、自动化的大规模生产。由于几何形是具有严密的、有规律的、有逻辑性的造型形式,既能充分地反映现代工业产品的功能特点和现代科学与工艺水平,又能适应现代工业和科学技术的发展,以及由人们物质生活、精神生活的现代化所引起的审美观的变化。

但是,工业产品的形态不完全由几何形态构成,人们对产品的形态创造还从自然界的有关形态得到启示与模仿,以及适应人的生理与心理因素需求而形成的形态。因此,概括起来讲,工业产品的形态类别主要为以下几种典型的形式。

(1) 具象形态 这是以自然形态为素材,对自然形态进行模仿而形成的一种造型形态。它表现自然界中某一具体形象并经过人为加工塑造成的一种形态。这类具象形态在现代工业产品中多用于玩具、生活用品和环境装饰品的造型形态,带有自然情趣和特别的趣味性。

(2) 模拟形态 这是以自然形态为模仿对象,但又不真实地完全模拟,而仅在某些形态的表现上体现某些自然形态的特点,以达到产品某种功能所需要的形态。如飞机的形态是模拟鸟的形体,现代小轿车的形体模仿鱼头的形态等等。这种形态创造方法在现代工业产品的造型设计中应用较多,但又排除了纯自然主义的模仿。

(3) 象征形态 它仍以自然形态为基础,但经过艺术的提炼与加工,经过夸张、变形等艺术升华,使之既有自然形的某些特征,但又不是自然形态的真实表现。这类形态创造在造型设计中应用较多。应用这类形态造型易表达某些联想和暗示,能产生较深刻、含蓄的意境。

(4) 抽象形态 它是以自然规律与运动为基础,以形态要素点、线、面的运动与演变而形成的多种多样的几何形态。这类形态具体但不具象,既有规律也可以无规律,尽管其形式抽象,但仍能使人们产生无穷的联想和思维。抽象形态的创造在现代工业产品的造型中应用最多,它依据线、面、体的组合与分割、运动与演变,构成具有现代审美特征的新形态。

### 12.1.2.2 形态要素及知觉感

自然界一切能见到和触摸到的物象,称为形态。现实世界中,自然创造着千变万化的物象,人类的各式各样的活动,又不断地创造着无尽的物象,这些物象的形态都是视觉能感受到的形体轮廓。如果将这些形体经过分解和概括,到达一定的限度,便都可由点、线、面几类形态要素的不同集合所体现。平面形象的构成主要以线构成肯定而实在的形;立体形象的构成是以面形态要素为基础,以一定的空间厚度(量感)来表现。因此,在自然界及生活的各个领域,凡是有形

的物体，不论宏观还是微观的物质，都是由基本的形态要素点、线、面、体而构成。

### 1. 点及其形式心理

点——位置的所在。点的理想形状一般是圆形，但也可为任意的自然形（如角点、星形点等），其特征与形态无关，而决定于面积的大小。

点具有高度集中的感觉。造型中利用空旷的面积中突出某一小点（小面积）的对比作用，极易起到导引视线、集中视线的视觉作用。例如，在机柜的某一空旷的大平面上，采用面积虽小但形象艺术、色彩夺目的一个小商标（标志）图案，如位置得当，小小的标志图案很易形成视觉的焦点，从而首先引起观察者的注意。合理利用点的性质，会使很小的点起到不可估量的作用。

同一空间、不同位置的点与点之间会产生心理上的不同感觉。点的运动、点的分散与密集，可以构成线和面的一些特征。

### 2. 线的类型及形式心理

线——点的移动轨迹称为线。线的性格表现主要取决于点的运动因素。点的运动因素主要是方向、速度。点的运动方位不同，就形成不同性质的直线、曲线。产品造型设计中经常要应用这些线型来实现其形体造型。

线有粗细、曲直、疏密等组合形式。粗线给人以刚劲感；细线给人以精细感。若在粗线的一侧或两侧加上细线则成了子母线，可产生静中有动、刚中有柔的视觉效果。在机电产品的造型中，曲线与直线的综合应用较为普遍。以直线为主、小曲率曲线为辅所构成的形态，具有刚柔结合的特色，给人温顺的感觉，同时产生较好的触感。

### 3. 面的类型及形式心理

面——线移动的轨迹称为面。造型中用的面主要有平面、折面和曲面三类。平面形简称为“形”，是物被限制于平面上的面，是平面上的轮廓所包围的面积。平面形一般分为“几何形”与“自由形”或“直线形”与“曲线形”。直线形又包括几何直线形和自由直线形。曲线形又包括几何曲线形和自由曲线形。

折面是多个不同方位的平面形的连续组合，可形成有规律的折面和无规律的折面，如单曲面、双曲面、旋转面、扭曲面、抛物面等。

由于人的视野特性和对“形”与自然现象的比拟联想，以及各类线型所具有的知觉不同，因而不同的平面形状具有不同性质及不同的视觉感和心理感。图 12-2 列出了常见的基本平面图形的感知特性。




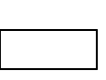



















 稳定严肃	 坚固稳定	 高耸雄壮	 稳定 宽广	 严肃丰满	 亲切动感	 动中有静	 动中有动
 稳定严肃	 有生气 不稳定	 稳定 自由		 较稳定	 自由 亲切	 不稳定	 动感强
 稳定有生气	 稳定较自由	 欠稳定生活	 活泼轻巧	 较严肃	 生动	 自由 轻巧	 亲切

图 12-2 常见的基本平面图形

#### 4. 体的构成及视觉效果

体——线、面的移动与组合构成体。体有封闭状和非封闭状。封闭状的体称为形体，非封闭的体则称为空间。立体是由面围成的，其个性与形成立体的面的个性相似。平面立体具有轮廓线明确、肯定的特点，并给人以刚劲、结实、坚固、明快的感觉。在视觉上，曲面立体的轮廓线不够确切、肯定，常随着观察者的位置变化而变化，它给人以圆滑、柔和、饱满、流畅、动的感觉。

立体构成型式主要有下面两种：

##### (1) 堆砌法

把一些基本几何体，采取堆砌、拼合的形式组合成新的形体，即组合体，见图 12-3。这种方法多用于塑造一些形体比较复杂的产品。

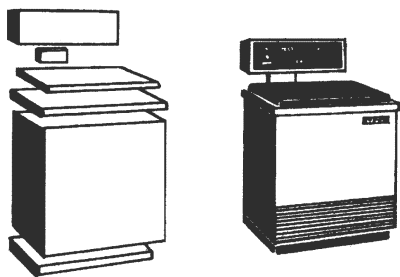


图 12-3 堆砌法造型

组合体的视觉特点：在组合体中，那些具有较强动感的基本几何体，对视觉的敏锐度高，首先引起注目。平面立体与曲面立体组合时，曲面立体首先引人注目。在产品的造型设计中，注意组合体的这些特点，以便形成良好的视觉中心。



图 12-4 切割法造型

##### (2) 切割法

在一个或几个基本几何体上进行切割，得到新的形象，见图 12-4。切割法是采用“减法”的形式进行造型，一般多用于一些比较简单形体的造型。

产品的立体感，是由产品的各个面受光后产生不同明暗层次所形成的。物体上的明暗层次越丰富，就越具有立体感。为取得良好的立体感，常采用“形”的凹凸、“色”的阴暗、“质”的粗细等变化，取得丰富的明暗层次，以增强形体的立体感。

造型，从某种意义上说，可视为某些基本几何体的组合。被组合后的不同基本几何体，在视觉中具有如下的特点：三角形具有强烈的刺激感，首先映入人的眼帘；对位于视觉中心上的形体，也具有相同的效果。动感强的形体，如圆锥体、球体等回转体，也具有先声夺人之效。当圆锥体和球体的体积相等时，人们首先感知的是圆锥体。当正方形的边长与球体的直径相等时，首先映入人的眼帘的则是球体。

### 12.1.3 电子设备的色彩设计

引起注意力的要素，第一是运动，第二是光线，第三是色彩。人们的生活离不开色彩，但是人们普遍喜欢的是单纯而又美丽的色彩秩序。我们购买工业品时，对于造型和功能的选择往往是十分认真和理性的，但是对于色彩几乎又是根据直觉选择的。

#### 12.1.3.1 色彩的常识

##### 1. 名词解释

(1) 光与色 我们借助于射到物体上的光看到世界，光使我们区分物体的形状、轮廓和色彩。而色彩，是不同频率的光波作用于视网膜而产生的感觉。

(2) 色相 我们在自然界中能区别所有的颜色——红、橙、黄、黄绿等。这些不同并有质的区别的色感，就叫色相。它是区分颜色的明显标志，是色彩作用于眼睛的第一特征。

(3) 彩度（纯度） 能够区别色彩鲜明程度的属性称为彩度。光谱中的颜色是极限纯度的

颜色,把高彩度颜色加入白、灰或者黑的颜色,都会使其变成低彩度颜色。

(4) 明度(亮度) 颜色与白色相距的大小称为明度。

(5) 原色 指任何颜色也调不出来的色,而它们的配合可调出其他颜色。原色有品红、黄、青。

(6) 间色 它是两种原色混合成的颜色。

(7) 标准色 即原色和间色的通称。红、橙、黄、绿、蓝、紫为标准色。

(8) 补色 例如红与绿、黄与紫、橙与蓝,又称对比色。

(9) 色调 指色彩总的倾向、基调。如暖调、明调、暗调等。

## 2. 色彩的对比与调和

色彩的对比就是把两种颜色摆在一起,以表现其对照效果的方法。红色的拖拉机在绿色的田野里分外鲜艳好看,就是这个道理。色彩的调和是指色彩配合的和谐统一,就是要正确地处理色彩的对比关系。

色彩的调和一般表现为:

(1) 同一调和 同一色相明暗、彩度之间的配合。

(2) 类似调和 色相、明度、彩度相近颜色的配合,具有融合感。

(3) 对比调和 色相、明度、彩度等彼此相差很远的色的配合,具有强调感。

## 3. 色彩的感觉与应用

(1) 不同明度与感觉上的面积大小 高明度色彩的物体看起来大。一个白色立方体和一个同样大小的黑色立方体,与眼睛保持同样的距离,白色的立方体看起来大。暗底色上的亮物体总比亮底色上的暗物体好像大些。如果我们在设计中,要想使某一工业品看上去显得大,那么就要使用明度高的色彩;相反,就用明度低的色彩。设计一部电视机,前面板颜色暗,屏幕就显得大而突出;反之,就小。

(2) 色彩的重量感 由于色彩的高度差异,就会产生不同的重量感。明亮色显得轻,暗色则显得重。淡蓝、蓝紫或黄色给人以轻的感觉,暖色给人以重的感觉。

(3) 色彩的空间感 在同一平面上的颜色,有的感觉离我们近,有的感觉离我们远,这一性质能够利用来加强物体的起伏,使物体轮廓清晰,主次分明。前抢色是暖的黄、橙、红、紫红以及它们的中间色;相反,青、蓝、紫及它们的中间色是后退的;绿色处于中间状态。当然,明度在这里有决定意义。

(4) 色彩的冷暖感 彩度高的红、橙、黄是暖色,淡蓝、蓝绿、蓝紫、白是冷色。把冷却器涂上红色是不当的,但把电烙铁的把手涂上红色却有一定的道理,因为在这里,引人注目成了主要矛盾。白色、淡的亮色反射热,暗的浊色吸收热。深暖色的金属家具在夏天令人感觉发烫,而白色的就显得凉爽。冷饮店的色调适合用淡雅的冷色。要根据色彩对于心理的影响来决定色彩的运用,寒色系的色加白色成为亮色,更能增加凉爽感。有些暖色加大量的白色也会增加凉的感觉,像浅粉红也是冷色。

(5) 色彩的清洁感 白色里混入淡黄能暗示清洁卫生。

### 12.1.3.2 电子产品造型设计中的色彩运用

电子产品造型中的色彩设计是为产品的功能和造型服务的,其目的就是用色彩的功能去加强产品的功能,追求美观,满足人们的审美要求,并与产品的使用环境及人的心理感受和谐、统一。

#### 1. 电子产品造型色彩的特点

电子产品色彩设计的特点是美观、大方、单纯、概括、简洁、明快,富有装饰性,对其色彩的



功能要素考虑较多,色彩设计时受到材质选取、产品功能等的制约。不同工艺取得的色彩效果不同。

电子产品的色彩设计要体现先进的科学技术与工艺、艺术美、材质美、造型美的结合,要具有时代特征,使产品的色彩既符合人们的精神要求,又经济适用。

## 2. 电子产品的色调选择

色调是指产品色彩的总倾向。对于一台产品来说,色调的选择是很重要的,它既要新颖美观,也要有较强时代感,又要考虑色彩的均衡与稳定。色调的选择应能反应造型功能的特点,给人以愉悦、生动、明快而柔和的感觉。

产品的色调之所以重要,是因为用不同的色彩调和所形成的艺术效果是不同的。一个产品必须有主调才能统一,色彩越杂,造成色彩分割,难以统调,和谐效果差,工艺性复杂,经济效果也差;色彩越少,装饰性越强,越易于统一。一般产品主色调以一色到二色为佳,三色则较少。色调主要根据产品功能、色彩功能以及产品使用者的喜恶爱好,并结合用户要求和商品性,认真选择。一旦主色调选定后,其余色彩则按前面讲述的配色规律进行配调。例如,小型电子产品色调爽朗、雅致、明快;大型的、组合型的产品就要色泽稳重均衡,美观而又协调。

## 3. 电子产品色彩设计的基本原则

(1) 色彩设计要因循美学法则 美学法则所包括的“统一与变化、调和与对比、均衡与稳定、节奏与韵律、主从与重点、过渡与呼应、比拟与联想”等,在色彩设计时同样运用,在实际设计中必须灵活应用。

(2) 色彩设计应符合产品功能要求和外形结构 产品的造型、结构、功能要求与色彩统一是配色成功的重要条件。如电冰箱根据功能设计用白、蓝、绿为主,增加清凉的感觉。有的产品由于功能的特殊要求,色彩设计的美学要求是次要的,而功能要求则是主要的。例如军用产品为达到隐蔽、减小目标,用绿色和保护色。另外,消防车颜色醒目、告警,联想到火;医疗用产品要求色彩清淡、雅致,这对医务人员和病员的心理需求是合适的。

(3) 根据使用环境选择色彩 色彩设计时,应注意产品使用环境和产品功能。我国幅员辽阔,南、北方气象条件相差很大,这就决定了产品的色调。如一般北方多用暖色,以增强人们心理上的暖和感;而南方多用冷色调,明快的色彩,以增加清凉的感觉。

(4) 色彩要有时代感 不同的时代有不同的审美标准。在色彩设计时必须考虑“流行色”,注意研究和预测,以符合人们当代普遍的色彩审美观念。

(5) 色彩要符合使用者、民族的生活习惯与爱好 由于历史和文化等种种原因,不同的国家与地区、民族对色彩的好恶各不相同。因此,色彩运用时要根据民族、使用人对色彩的感情来选择。设计得好,将会受到欢迎;否则,将会受到冷遇,使产品滞销。

(6) 色彩设计要考虑涂覆工艺和色质并重 产品色彩设计时,还要考虑涂覆工艺,采用适宜的工艺手段,以产生良好的色度效果。

(7) 人机关系谐调的要求 不同的色彩会使人产生不同的心理感受。色彩设计应使使用者产生舒适、轻快、振作的感受,从而形成有利于工作的情绪。色彩设计要充分体现人机关系间的谐调关系,提高工作效率,减少差错事故,并有益于使用者的身心健康。

(8) 极色、光泽色的合理利用 极色就是黑、白两色。光泽色指金、银、镀铬等具有光泽的色。由于它们都含有非彩色因素,极易与其他色彩协调,用于衬底、线型装饰,用做两色之间的过渡,使众色的色彩归于统一,起到骨架作用,提高主色调的色阶。同时金属的光泽色具有强烈的装饰作用,使造型产生辉煌富丽、豪华高贵的感觉。但又要避免大面积的使用反光性的光泽色,以免引起耀眼的刺激而带来操作者视觉的疲劳且增加了产品的成本。

综上所述, 色彩设计应以实用为目的, 运用科学的规律, 体现时代性, 使型、色、质融为一体, 产生优雅的感觉, 为产品功能的充分发挥而服务。

## 12.2 整机机械结构设计

电子设备的设计, 除了使产品的各项技术指标得到满足外, 还应研究和解决产品的结构形态如何与产品的功能相统一、与使用要求相统一、与由产品组成的工作环境和生活环境相统一, 以及适合人的生理和心理特性等, 以满足用户的要求。在电子设备中, 由工程材料按合理的连接方式进行连接, 且能安装电子元器件及机械零、部件, 使设备成为一个整体的基础结构, 称为电子设备的整机结构。这种结构包括: 机箱、机架、机柜结构; 分机插箱、底座、积木盒结构; 导向定位装置; 面板、指示和操纵装置等。

### 12.2.1 概述

#### 12.2.1.1 电子设备结构设计基本要求

由于电子技术的迅猛发展, 组成设备的元器件越来越多, 体积越来越小, 使用范围越来越广, 设备所处的工作环境条件越来越复杂, 对设备的使用精度和可靠性要求越来越高。电子设备结构设计直接关系到产品的功能体现、可靠性、可维修性和实用美观, 并影响用户的心理状态。

电子设备的整机结构设计已发展成以人机工程学、技术美学、机械学、力学、传热学、材料学、表面装饰等为基础的综合性学科; 工艺技术是保证产品实现其使用功能的重要手段, 因此, 结构设计已成为实现产品技术指标的重要组成部分, 必然对它提出更高的要求。

##### (1) 保证产品技术指标的实现

一切电子设备的性能具体体现于产品技术指标, 实现电子设备要求达到的电性能技术指标, 主要依赖于电路设计。整机结构设计必须采取各种措施, 保证指标的实现。如在结构设计中必须综合考虑设备内部元器件相互间的电磁干扰和热的影响, 以提高电气参数的稳定性。另外必须注意结构的强度、刚度等问题, 以免产生变形, 引起电气接触不良、机械传动精度下降, 甚至受振后遭到破坏。因此必须按实际工作环境和条件, 采取相应措施, 提高设备的可靠性和使用寿命, 保证产品技术指标的实现。

##### (2) 便于设备的操作、使用与安装、维修

一切电子设备的价值都是通过使用体现出来, 因此在整机结构设计时必须保证满足使用要求。在使用电子设备时, 一般都需要通过各种旋钮、开关和指示装置来进行操作控制。为了能有效地操作和使用设备, 必须使设备的结构设计符合人的心理和生理特点。在产品整机结构设计时, 既要合理地安排操作控制部分, 做到操作简便、合理、可靠; 同时, 又要使结构便于装卸和缩短维修时间, 以及保护操作人员的安全。

##### (3) 良好的结构工艺性

结构与工艺是密切相关的, 采用不同的结构就相应有不同的工艺, 新材料、新设备、新工艺的出现, 反过来又促进结构的改进。机箱结构设计的质量必须有良好的工艺措施来保证。因此, 在整机设计时必须从生产实际出发, 使所设计的零、部、组件具有良好的工艺性。

产品的技术性能指标和生产工艺可能性之间存在着矛盾, 要求零、部、组件具有过高的技术指标, 会给工艺带来困难, 甚至工艺上无法达到。为此, 应当对产品的技术指标有充分而深入的

了解；对材料生产情况和新工艺发展情况，以及本厂设备和工艺水平有全面的了解，这样，才有可能设计出具有良好工艺性的产品。

在设计产品的过程中，当考虑采用某种结构时（从结构形式到具体的结构要素），都必须考虑实现这种结构的工艺可能性和工艺合理性。

#### （4）贯彻执行标准化

标准化是我国的一项重要技术经济政策和管理措施，它对于保证和促进产品质量的提高，保证产品的互换性和生产技术的协作配合以及便于使用和维修，加强企业管理，降低成本和提高生产效率都具有十分重大的意义。结构设计中必须尽量减少特殊零、部件的数量，增加通用件的数量，尽可能多地采用标准化、规格化的零、部件和尺寸系列。

#### （5）体积小、重量轻

减小设备的体积和重量可以节约材料，有利于加工和运输。车载和机载设备重量轻、结构紧凑，可以减小惯性，降低动力消耗。在进行整机结构设计时，必须合理地布局，提高设备的紧凑性，选用轻质材料并尽量简化其结构，最大限度地降低设备的体积和重量，这是一项重要的技术经济指标，必须给予足够的重视。

#### （6）造型美观协调

设备的选型是否美观、协调，直接影响到使用者的心理。从某种意义上讲，它直接影响到产品的竞争能力。特别是对民用电子产品，造型和色彩是不可忽视的因素。造型美观、色彩协调与产品的结构型式、材料、表面涂覆、色彩调和等因素有关，在保证功能与经济性的条件下，应做到产品造型新颖、美观大方、色彩协调。

### 12.2.1.2 电子设备整机结构形式

组成整机的所有结构件，都必须用机械的方法固定起来，以满足整机在机械、电气和其他方面性能指标的要求。合理的结构及结构装配的牢固性，也是电气性能安全可靠的基本保证。不同的电子设备组装级，其结构形式也不一样。

（1）插件结构形式 这是应用最广的一种结构形式，主要由印制电路板组成。在印制板的一端备有插头，构成插件，通过插座与布线连接，有的直接将引出线与布线连接，有的则根据组装结构的需要，将元器件直接装在固定的组件支架上，便于元器件的组合以及与其他部分配合连接。

（2）单元盒结构形式 这是适应设备内部需要屏蔽或隔离而采用的结构形式。通常将这一部分元器件装在一块印刷板上或支架上，放在一个封闭的金属盒内，通过插头座或屏蔽线与外部接通。单元盒一般插入相应的机架导轨上，或固定在容易拆卸的位置，便于维修。

（3）插箱结构形式 一般将插件和一些机电元件放在一个独立的箱体中，该箱体有接触插头，通过导轨插入到机架上。插箱一般有“无面板”和“有面板”两种形式，它往往在电路和结构上都有相对的独立性。

（4）底板结构形式 这是目前电子设备中采用较多的一种结构形式，它是一切大型元器件、印制电路及机电元件的安装基础，常和面板配合，很方便地将电路与控制、指示、调谐等部分连接，对于不太复杂的机器，一般只采用一块底板；有些设备为了便于组装，常采用多块小面积底板分别与支架相连，这对削弱地电流窜扰有利，在整机装配时也很方便。

（5）机体结构形式 机体结构是决定产品外形并使其成为一个整体的基础结构。它可以给内部安装件提供组装在一起并得到保护的基本条件，还能给产品装配、使用和维修带来方便。

电子设备的种类不同,其结构的外形和复杂程度有很大的差异。一般机体结构又分为柜式、箱式、台式和盒式四类。结构复杂、尺寸较大的电子设备采用柜式结构,中等结构的电子设备则采用箱式结构,台式和盒式结构常见于民用产品。

机箱、机柜具有不同的含义。机箱是把整个设备结合成机械整体的主体,靠它保证整机的机械结构强度。通常用于尺寸较小和结构简单的中、小型电子设备,其外壳往往是箱形的,所以称之为机箱。机箱有几种结构型式,其中,固定式机箱,多用于固定设备和安装于运载工具上的中小设备;背负式机箱,多用于野外及军用设备;台式机箱,多用于电子仪器及室内小型设备。

对于结构复杂、尺寸较大的电子设备,为了便于安装、使用和检修,往往将设备分为若干分机(插箱),安置在一个共同的安装架上。这种用以组合安装设备的安装架,称为机架。封闭式的机架称为机柜。机柜由骨架(框架)、插箱、导轨和外壳、盖板等主要零、部件所组成。

机柜按其外形基本上可分为立柜式、控制台式两种结构。目前绝大多数大、中型设备采用立柜式结构。根据复杂程度和插箱数目的不同,电子设备可以分成若干个分机,而设备的各个分机集中安装在一个机柜内,因而使全机集中,便于操作管理,生产成本较低。但是,这样有时显得体积和重量较大,不仅运输不便,而且给制造带来一定困难。这种机柜一般用于固定式或机动性不大的电子设备,如大型电台、广播发射台、大型计算机、程控设备等。

对于空用、船载和车载电子设备,由于受到占地空间限制,不适宜采用集中式机柜,可将设备的各个分机,分散为若干小型的独立机柜(机箱),这样便于设备的安装和运输,可分散布置在运载工具上;但这给操作、管理及维修带来不便,甚至因相互间的电气联接环节增多,而降低了设备使用的可靠性。

### 12.2.1.3 钣金结构件设计要点

#### 1. 冲裁

钣金材料冲压件的几何形状、尺寸和精度对冲压工艺影响很大。冲压件具有良好的加工工艺性,这有利于节省材料、减少工序、提高模具使用寿命和产品质量,同时,也可以有效降低产品成本。

##### (1) 冲裁过程

冲裁是利用冲模使材料分离的一种冲压工艺,包括落料、冲孔、切口、剖切和修边等工艺,但在一般情况下往往指落料和冲孔。此工艺即可以直接把材料制成零件,又可以为弯曲和成型等工序做准备。从材料上冲下所需形状的零件或毛坯,称为落料,在工件上冲出所需形状的孔,叫做冲孔。冲裁过程如下:

① 弹性变形。当冲裁开始时,凸模对材料加压;由于弯矩作用,使材料不仅产生弹性压缩,而且还有拉弯,并稍许把材料压进凹模腔口。此阶段内的应力状态尚未达到塑性条件,仍处于弹性变形阶段。

② 塑性变形。凸模继续对材料加压,当材料的应力状态满足塑性条件时,产生塑性变形,同时,还伴有材料的弯曲和拉伸。随着变形的增加,模具口附近应力集中,直到应力达到最大值并出现微裂纹。

③ 断裂分离。凸模连续压入,已形成的上、下微裂纹逐渐扩大并向材料内部延伸,当两条裂纹重合或相交时,材料便被剪断分离。

根据对冲裁过程的分析知道,冲裁用凸、凹模之间的间隙对于冲裁件质量、冲裁力和模具寿命等影响很大。冲裁模间隙值的理论确定法的主要依据是保证冲裁时材料上、下两剪裂纹重合而

交于一条连线。模具刃口尺寸精度是影响冲裁件尺寸精度的首要因素，模具的合理间隙也要由模具刃口尺寸及其公差来保证。

计算冲裁力的目的在于合理选用压力机和设计模具。显然压力机的吨位必须大于所计算的冲裁力，以适应冲裁的要求。在冲裁高强度材料或厚度大、周边长的工件时，所需冲裁力可能会超过现有压力机吨位，此时必须考虑采取降低冲裁力的措施。

## (2) 冲裁工艺设计要点

冲裁分为普通冲裁和精密冲裁。由于加工方法的不同，冲裁件的加工工艺也有所不同。目前电子设备结构件一般只用到普通冲裁，因此下面介绍普通冲裁的结构工艺。

① 精冲法又称齿圈压板冲裁法。这种冲裁法的凸、凹模间隙极小，凹模刃口带圆角，在模具结构上还装有一个齿圈压板与一个顶出圈。

② 冲裁件的形状和尺寸尽可能简单、对称，以使排样时废料最少，如图 12-5 所示。

③ 冲裁件的外形及内孔应避免尖角。在直线或曲线的连接处要有圆弧连接，圆弧半径  $R \geq 0.5t$  ( $t$  为材料壁厚)，如图 12-6 所示。

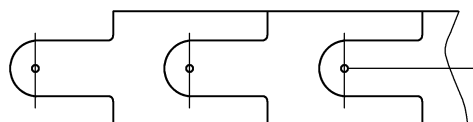


图 12-5 冲裁件的排样

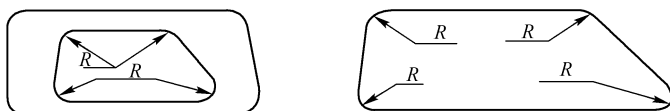


图 12-6 冲裁件圆角半径的最小值

④ 冲裁件应避免窄长的悬臂与狭槽。冲裁件的凸出或凹入部分的深度和宽度，一般情况下，应不小于  $1.5t$  ( $t$  为料厚)，同时应该避免窄长的切口和过窄的切槽，以便增大模具相应部位的刃口强度，如图 12-7 所示。

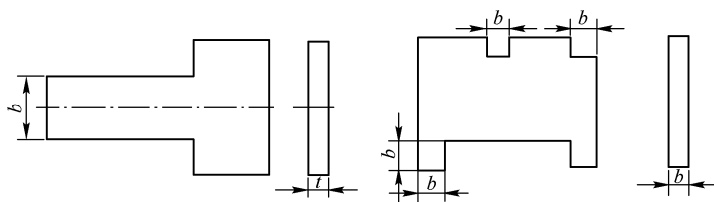


图 12-7 避免窄长的悬臂和凹槽

⑤ 冲孔优先选用圆形孔，冲孔最小尺寸与孔的形状、材料机械性能和材料厚度有关。图 12-8 和表 12-1 中， $t$  为材料厚度，冲孔最小尺寸一般不小于 0.3mm。

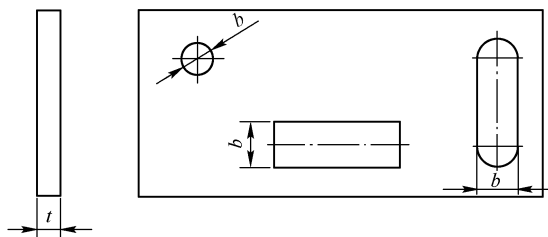


图 12-8 冲孔形状示例

表 12-1 冲孔最小尺寸列表

材 料	圆孔直径 $b$	矩形孔短边宽 $b$
高碳钢	$1.3t$	$1.0t$
低碳钢、黄铜	$1.0t$	$0.7t$
铝	$0.8t$	$0.5t$

⑥ 冲裁的孔间距与孔边距。零件的冲孔边缘离外形的最小距离随零件与孔的形状不同有一定的限制，见图 12-9。当冲孔边缘与零件外形边缘不平时时，该最小距离应不小于材料厚度  $t$ ；平时时，应不小于  $1.5t$ 。

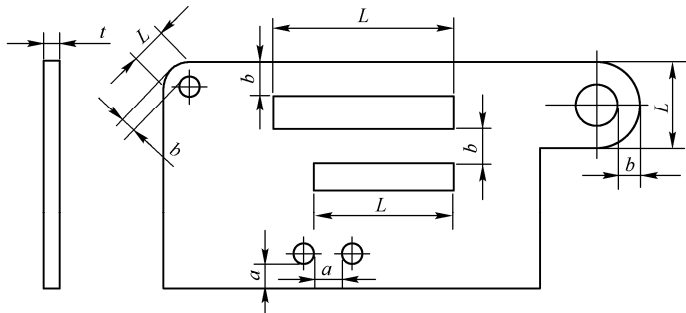


图 12-9 冲裁件孔边距、孔间距示意图

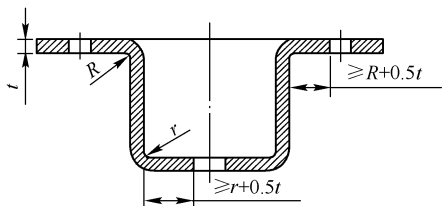


图 12-10 折弯件、拉伸件孔壁与  
工件直壁间的距离

⑦ 折弯件或拉伸件冲孔时，其孔壁与工件直壁之间应保持一定的距离，如图 12-10 所示。

⑧ 冲裁件的毛刺设计。

冲裁件毛刺超过一定的高度是不允许的，冲压件毛刺高度的极限值见表 12-2。f 级（精密级）适用于较高要求的零件；m 级（中等级）适用于中等要求的零件；g 级（粗糙级）适用于一般要求的零件。

表 12-2 冲压件毛刺高度的极限值(mm)

材料壁厚(mm)	材料抗拉强度 (N/mm <sup>2</sup> )											
	>100~250			>250~400			>400~630			>630		
	f	m	g	f	m	g	f	m	g	f	m	g
>0.7~1.0	0.12	0.17	0.23	0.09	0.12	0.17	0.05	0.07	0.1	0.03	0.04	0.05
>1.0~1.6	0.17	0.25	0.34	0.12	0.18	0.24	0.07	0.11	0.15	0.04	0.06	0.08
>1.6~2.5	0.25	0.37	0.5	0.18	0.26	0.35	0.11	0.16	0.22	0.06	0.09	0.12
>2.5~4.0	0.36	0.54	0.72	0.25	0.37	0.5	0.2	0.3	0.4	0.09	0.12	0.18

一般不要整个结构件断口全部压毛边，这样会增加成本。尽量在下述情况使用：暴露在外面的断口；人手经常触摸到的锐边；需要通过线缆的孔或槽；有相对滑动的部位。

2. 折弯

(1) 弯曲过程

板料在外加弯曲力矩作用下发生弯曲变形，先通过弹性弯曲阶段。随着外加弯矩的增加，板料的弯曲变形增大，其内、外表层金属先达到屈服极限，板料开始由弹性变形阶段转入塑性变形阶段。

变形区主要处在弯曲件的圆角部分，而在远离圆角区的两侧则不发生变形。在弯曲变形区内，其外区的切向金属受拉伸长，其内区的切向金属受压缩短。在这两个变形区内，有一层金属层长度不变，即应变中性层。在冲压板料时，为确定凸模的最小圆角半径及弯曲件的毛坯尺寸，必须先确定应变中性层的位置。

在弯曲过程中,材料外层受拉应力,当材料的厚度一定时,弯曲半径越小,则受拉应力越大。弯曲变形结束后不受外力作用时,总是伴有弹性变形,使弯曲间的弯曲中心角与弯曲半径变得同模具的尺寸不一致,这种现象称为回弹。影响回弹量的因素有材料的机械性能、弯曲变形程度、弯曲中心角、弯曲方式、工件形状、模具结构等。

### (2) 折弯工艺性设计要点

① 折弯件的最小弯曲半径。材料弯曲时,弯曲半径越小,材料的拉伸和压缩就越严重;当外层圆角的拉伸应力超过材料的极限强度时,就会产生裂缝和折断,因此,弯曲零件的结构设计,应避免过小的弯曲圆角半径。

② 弯曲件的直边高度。一般情况下,弯曲件的直边高度不宜太小,最小高度按图 12-11 要求:  $h > 2t$ 。

如果设计需要弯曲件的直边高度  $h \leq 2t$ , 则首先要加大弯边高度,弯好后再加工到需要尺寸;或者在弯曲变形区内加工浅槽后,再折弯,如图 12-12 所示。

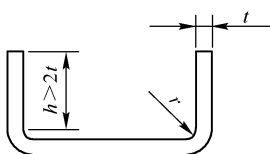


图 12-11 弯曲件的直边高度最小值

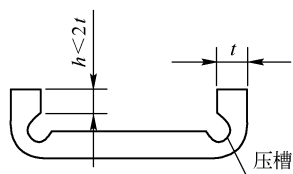


图 12-12 特殊情况下的直边高度要求

当设计弯边侧边带有斜角的弯曲件时(见图 12-13),侧面的最小高度为:  $h = (2 \sim 4)t > 3\text{mm}$ 。

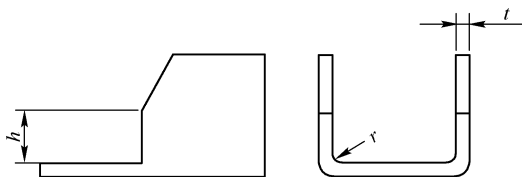
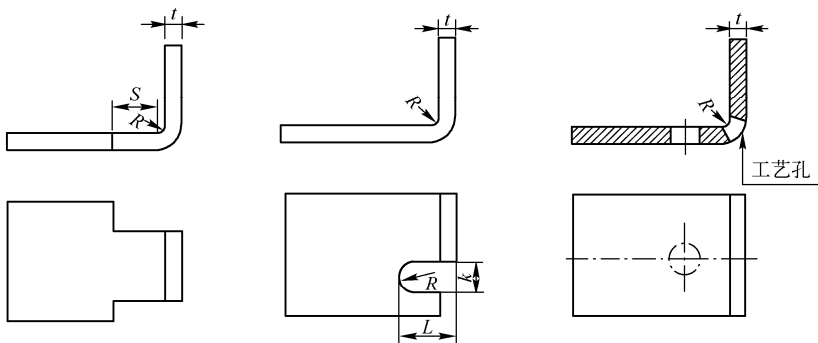


图 12-13 弯边侧边带有斜角的直边高度

③ 折弯件上的孔。先冲孔后折弯,孔的位置应处于弯曲变形区外,避免弯曲时孔会产生变形。

④ 局部弯曲的工艺切口。局部弯曲某一段边缘时,为了防止尖角处应力集中产生弯裂,可将弯曲线移动一定距离,以离开尺寸突变处,如图 12-14 (a) 所示;或开工艺槽,如图 12-14 (b);或冲工艺孔,如图 12-14 (c) 所示。注意图中的尺寸要求:  $S \geq R$ ; 槽宽  $k \geq t$ ; 槽深  $L \geq t + R + k/2$ 。



(a) 将弯曲线移动一定距离

(b) 开工艺槽

(c) 冲工艺孔

图 12-14 局部弯曲的设计处理方法

当孔在折弯变形区内时, 采用的切口形式如图 12-15 所示。

⑤ 带斜边的折弯。带斜边的折弯边应避免变形区, 如图 12-16 所示。

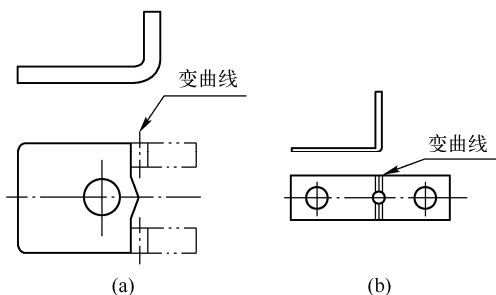


图 12-15 切口形式示例

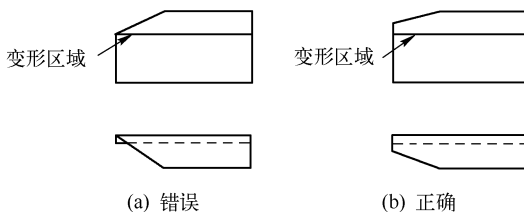


图 12-16 带斜边的折弯边应避免变形区



图 12-17 死边的最小长度  $L$

⑥ 打死边的设计要求。打死边的死边长度与材料的厚度有关。如图 12-17 所示, 一般死边最小长度  $L \geq 3.5t + R$ 。其中  $t$  为材料壁厚,  $R$  为打死边前道工序的最小内折弯半径。

⑦ 设计时添加的工艺定位孔。为保证毛坯在模具中准确定位, 防止弯曲时毛坯偏移而产生废品, 应预先在设计时添加工艺定位孔, 如图 12-18 所示。特别是多次弯曲成型的零件, 均必须以工艺孔为定位基准, 以减少累积误差, 保证产品质量。

⑧ 标注弯曲件相关尺寸时要考虑工艺性。如图 12-19 所示, 图 (a) 先冲孔后折弯,  $L$  尺寸精度容易保证, 加工方便。图 (b) 和图 (c) 如果尺寸  $L$  精度要求高, 则需要先折弯后加工孔, 加工麻烦。

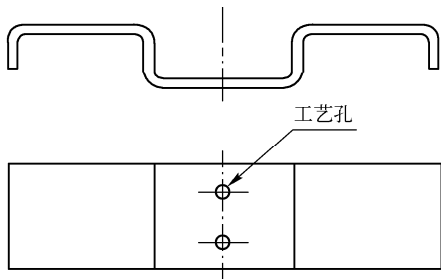


图 12-18 多次折弯时添加的工艺定位孔

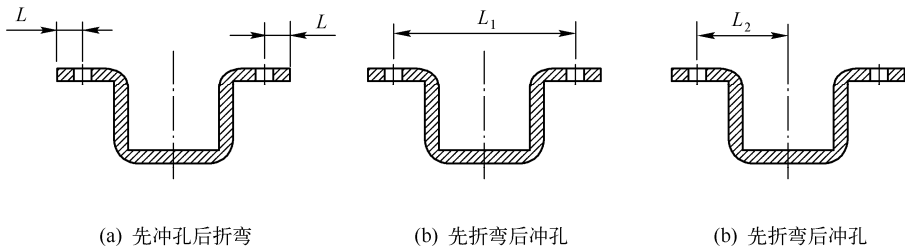


图 12-19 弯曲件标注示例

⑨ 弯曲件的回弹。折弯件的内圆角半径与板厚之比越大, 回弹就越大。目前主要是由生产厂家在模具设计时, 采取一定的措施进行规避。如图 12-20 所示, 在弯曲区压制加强筋, 不仅可以提高工件的刚度, 也有利于抑制回弹。

### 3. 拉伸

#### (1) 拉伸过程

将平板毛坯通过拉伸模具制成开口筒形或其他断面形状的零件, 或将筒形或其他断面形状毛坯再制成筒形或其他断面形状的零件, 这种工序成为拉伸 (或拉延), 如图 12-21 所示。



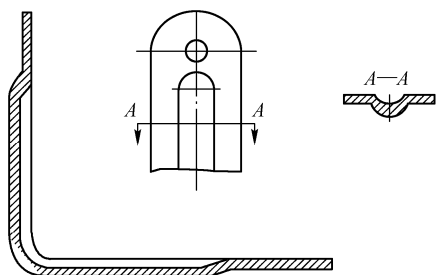


图 12-20 设计上抑制回弹的方法示例

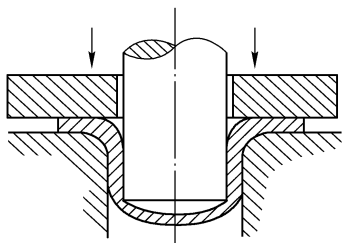


图 12-21 拉伸

凹模口凸缘材料在径向拉应力和切向压应力的共同作用下,材料发生塑性变形而逐渐进入凹模。凹模圆角这部分材料除了径向拉应力和切向压应力以外,还承受凹模圆角处的压力、摩擦力和弯曲作用而产生的压应力,这是一个过渡区。筒壁这部分材料已经成为筒形,材料不会有大的变形。凸模圆角这部分材料承受着凸模圆角作用的径向和切向拉应力。还承受凸模圆角的压力和弯曲作用在厚度方向上的压应力。筒底材料在拉伸过程中保持平坦,不产生大的变形,只是由于凸模拉伸力的作用,材料承受双向拉应力而略变薄。

## (2) 拉伸工艺设计要点

① 拉伸件底部与直壁之间的圆角半径大小要求。如图 12-22 所示,拉伸件底部与直壁之间的圆角半径应大于板厚,即  $r_1 \geq t$ 。为了使拉伸进行得更顺利,一般取  $r_1 = (3 \sim 5)t$ ,最大圆角半径应小于或等于板厚的 8 倍,即  $r_1 \leq 8t$ 。

② 拉伸件凸缘与壁之间的圆角半径。拉伸件凸缘与壁之间的圆角半径应大于板厚的 2 倍,即  $r_2 \geq 2t$ ,为了使拉伸进行得更顺利,一般取  $r_2 = (5 \sim 10)t$ ,最大凸缘半径应小于或等于板厚的 8 倍,即  $r_2 \leq 8t$ ,参见图 12-22。

③ 圆形拉伸件的内腔直径。圆形拉伸件的内腔直径应取  $D \geq d + 10t$ ,以便在拉伸时压板压紧不致起皱(参见图 12-22)。

④ 矩形拉伸件相邻两壁间的圆角半径。矩形拉伸件相邻两壁间的圆角半径应取  $r_3 \geq 3t$ ,为了减少拉伸次数应尽可能取  $r_3 \geq H/5$ ,以便一次拉出来,如图 12-23 所示。

⑤ 圆形无凸缘拉伸件一次成型时高度与直径的尺寸关系要求。圆形无凸缘拉伸件一次成型时,高度  $H$  和直径  $d$  之比应小于或等于 0.4,即  $H/d \leq 0.4$ ,如图 12-24 所示。

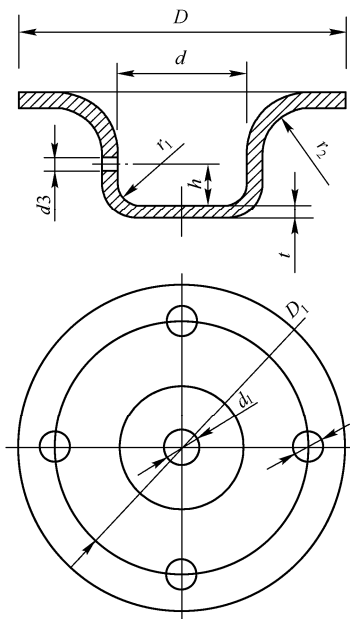


图 12-22 拉伸件圆角半径大小

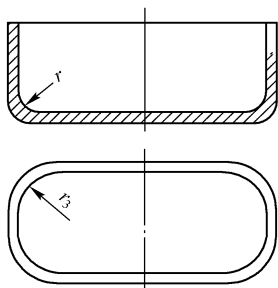


图 12-23 矩形拉伸件相邻两壁间的圆角半径

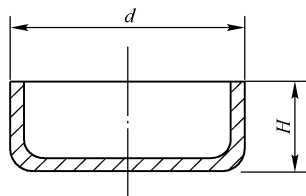


图 12-24 圆形无凸缘拉伸件一次成型时,高度与直径的尺寸关系

⑥ 拉伸件设计图纸上尺寸标注的注意事项。拉伸件由于各处所受应力大小各不相同，使拉伸后的材料厚度发生变化。一般来说，底部中央保持原来的厚度，底部圆角处材料变薄，顶部靠近凸缘处材料变厚，矩形拉伸件四周圆角处材料变厚。

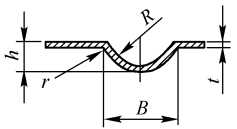
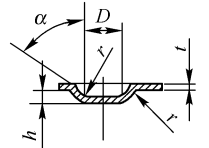
在设计拉伸产品时，对产品图上的尺寸应明确注明必须保证外部尺寸或内部尺寸，不能同时标注内、外尺寸。拉伸件凹凸圆弧的内半径以及一次成型的圆筒形拉伸件的高度尺寸公差为双面对称偏差，其偏差值为国标（GB）16级精度公差绝对值的一半，并冠以“±”号。

4. 成型

(1) 加强筋

在板状金属零件上压筋，有助于增加结构刚性，加强筋结构及其尺寸选择参见表 12-3。

表 12-3 加强筋结构及尺寸选择

名 称	简 图	$R$	$h$	$B$ 或 $D$	$r$	$\alpha^\circ$
打筋		$(3\sim4) t$	$(3\sim2) t$	$(7\sim10) t$	$(1\sim2) t$	—
打凸		—	$(2\sim1.5) t$	$\geq 3h$	$(0.5\sim1.5) t$	$(15\sim30) t$

(2) 百叶窗

百叶窗通常用于各种罩壳或机壳上起通风散热作用，其成型方法是借凸模的一边刃口将材料切开，而凸模的其余部分将材料同时作拉伸变形，形成一边开口的起伏形状。百叶窗的典型结构参见图 12-25，尺寸要求： $a \geq 4t$ ； $b \geq 6t$ ； $h \leq 5t$ ； $L \geq 24t$ ； $r \geq 0.5t$ 。

(3) 孔翻边

孔翻边形式较多，带加工螺纹的内孔翻边结构如图 12-26 所示；尺寸参数见表 12-4。

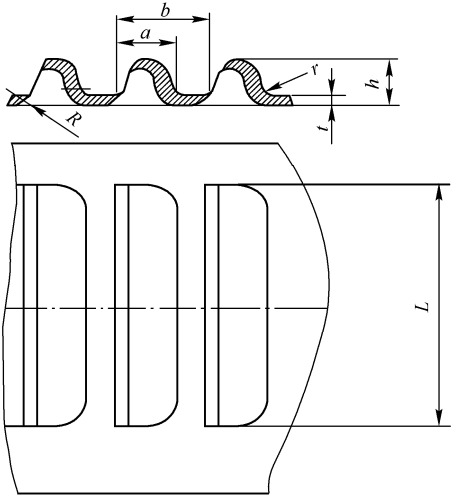


图 12-25 百叶窗的结构

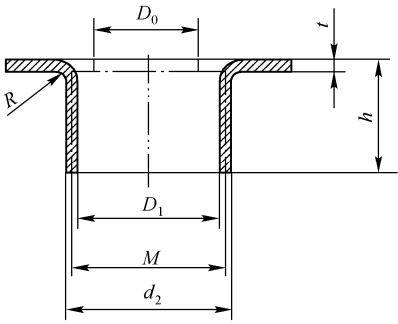


图 12-26 带螺纹孔的内孔翻边结构示意图

表 12-4 带螺纹孔的内孔翻边尺寸参数

螺纹	材料厚度 $t$	翻边内孔 $D_1$	翻边外孔 $d_2$	凸缘高度 $h$	预冲孔直径 $D_0$	凸缘圆角半径 $R$
M3	0.8	2.55	3.38	1.6	1.9	0.6
	1		3.25	1.6	2.2	0.5
			3.38	1.8	1.9	
			3.5	2	2	
	1.2		3.38	1.92	2	0.6
			3.5	2.16	1.5	
	1.5		3.5	2.4	1.7	0.75
M4	1	3.35	4.46	2	2.3	0.5
	1.2		4.35	1.92	2.7	0.6
			4.5	2.16	2.3	
			4.65	2.4	1.5	
	1.5		4.46	2.4	2.5	0.75
			4.65	2.7	1.8	
	2		4.56	2.2	2.4	1
M5	1.2	4.25	5.6	2.4	3	0.6
	1.5		5.46	2.4	2.5	0.75
			5.6	2.7	3	
			5.75	3	2.5	
	2		5.53	3.2	2.4	1
			5.75	3.6	2.7	
	2.5		5.75	4	3.1	1.25
M6	1.5	5.1	7.0	3	3.6	0.75
	2		6.7	3.2	4.2	1
			7.0	3.6	3.6	
			7.3	4	2.5	
	2.5		7.0	4	2.8	1.25
			7.3	4.5	3	
	3		7.0	4.8	3.4	1.5

12.2.1.4 塑料件设计制造要点

由于塑料材料组成的多样性，结构、形状的多变性，使得它比起其他材料有更理想的设计特性。特别是它的形状设计、材料选择、制造方法选择，更是其他大部分材料无可比拟的。因为其他的大部分材料，其设计者在外形或制造上，都受到相当的限制，有些材料只能利用弯曲、熔接等方式来成型。当然，塑料材料选择的多样性，也使得设计工作变得更为困难，如我们所知，目前已经有一万种以上的不同塑料被应用过，虽然其中只有数百种被广泛应用，但是，塑料材料的形成并不是由单一材料所构成，而是由一群材料族所组合而成，其中每一种材料又有其特性，这使得材料的选择应用更为困难。

1. 塑料制品设计制造程序

(1) 接受任务书

成型塑料制件的任务书通常由制件设计者提出，其内容如下：

- ① 经过审签的正规制件图纸,并注明采用塑料的牌号、透明度等。
- ② 塑料制件说明书或技术要求。
- ③ 制件产量。
- ④ 塑料制件样品。

通常,模具设计任务书由塑料制件工艺员根据成型塑料制件的任务书提出,模具设计人员以成型塑料制件任务书、模具设计任务书为依据来设计模具。

## (2) 收集、分析、消化原始资料

① 收集整理有关制件设计、成型工艺、成型设备、机械加工及特殊加工资料,以备设计模具时使用。

② 消化塑料制件图,了解制件的用途,分析塑料制件的工艺性、尺寸精度等技术要求。例如,塑料制件在外表形状、颜色透明度、使用性能等方面的要求;塑件的几何结构、斜度、嵌件等情况是否合理,熔接痕、缩孔等成型缺陷的允许程度;有无涂装、电镀、胶接、钻孔等后加工。选择塑料制件尺寸精度最高的尺寸进行分析,看看估计成型公差是否低于塑料制件的公差,能否成型出合乎要求的塑料制件来。此外,还要了解塑料的塑化及成型工艺参数。

③ 消化工艺资料,分析工艺任务书所提出的成型方法、设备型号、材料规格、模具结构类型等要求是否恰当,能否落实。成型材料应当满足塑料制件的强度要求,具有好的流动性、均匀性和各向同性、热稳定性。

④ 根据塑料制件的用途,成型材料应满足染色、镀金属的条件、装饰性能、必要的弹性和塑性、透明性或者相反的反射性能、胶接性或者焊接性等要求。

## (3) 确定成型方法

采用直压法、铸压法或是注射法。

## (4) 选择成型设备

必须熟知各种成型设备的性能、规格、特点。例如,对于注射机来说,在规格方面应当了解以下内容:注射容量、锁模压力、注射压力、模具安装尺寸、顶出装置及尺寸、喷嘴孔直径及喷嘴球面半径、浇口套定位圈尺寸、模具最大厚度和最小厚度、模板行程等。

要初步估计模具外形尺寸,判断模具能否在所选的注射机上安装和使用。

## (5) 具体结构方案

① 确定模具类型。如压制模(敞开式、半闭合式、闭合式)、铸压模、注射模等。

② 确定模具类型的主要结构。选择理想的模具结构在于确定成型设备、理想的型腔数,在绝对可靠的条件下能使模具本身的工作满足该塑料制件的工艺技术和生产经济的要求。对塑料制件的工艺技术要求,是要保证塑料制件的几何形状、表面光洁度和尺寸精度。生产经济要求,是要使塑料制件的成本低、生产效率高,模具能连续地工作、使用寿命长,节省劳动力。

a. 根据塑件的几何结构特点、尺寸精度要求、批量大小、模具制造难易、模具成本等确定型腔数量及其排列方式。对于注射模来说,塑料制件精度为3级和3a级,重量为5g,采用硬化浇注系统,型腔数取4~6个;塑料制件为一般精度(4~5级),成型材料为局部结晶材料,型腔数可取16~20个;塑料制件重量为12~16g,型腔数取8~12个;而重量为50~100g的塑料制件,型腔数取4~8个。对于无定型的塑料制件建议型腔数为24~48个、16~32个或6~10个。当再继续增加塑料制件重量时,就很少采用多腔模具。

b. 确定分型面。分型面的位置要有利于模具加工、排气、脱模及成型操作。

c. 确定浇注系统(主浇道、分浇道及浇口的形状、位置、大小)和排气系统(排气的方法、

排气槽位置、大小)。

d. 选择顶出方式(顶杆、顶管、推板、组合式等方式顶出),决定侧凹处理方法、抽芯方式。

e. 决定冷却、加热方式及加热冷却沟槽的形状、位置、加热元件的安装部位。

f. 根据模具材料、强度计算或者经验数据,确定模具零件厚度及外形尺寸、外形结构及所有连接、定位、导向件位置。

g. 确定主要成型零件、结构件的结构形式。

h. 考虑模具各部分的强度,计算成型零件工作尺寸。

以上这些问题如果解决了,模具的结构形式自然就解决了。这时,就应该着手绘制模具结构草图,为正式绘图做好准备。

i. 绘制模具图,要求按照国家制图标准绘制,但是也要求结合本厂标准和国家未规定的工厂习惯画法。在画模具总装图之前,应绘制工序图,并要符合制件图和工艺资料的要求。如果成型后除了修理毛刺之外,不再进行其他机械加工,那么工序图就与制件图完全相同。在工序图下面最好标出制件编号、名称、材料、材料收缩率、绘图比例等。通常就把工序图画在模具总装图上。

③ 绘制总装结构图。绘制总装图尽量采用 1:1 的比例,先由型腔开始绘制,主视图与其他视图同时画出。模具总装图应包括以下内容:模具成型部分结构;浇注系统、排气系统的结构形式;分型面及分模取件方式;外形结构及所有连接件、定位、导向件的位置;标注型腔高度尺寸(不强求,根据需要)及模具总体尺寸;辅助工具(取件卸模工具,校正工具等)。按顺序将全部零件序号编出,并且填写明细表,标注技术要求和使用说明。

④ 模具总装图的技术要求内容。对于模具系统的性能要求,例如,对顶出系统、滑块抽芯结构的装配要求;对模具装配工艺的要求,例如,模具装配后分型面的贴合面的贴合间隙应不大于 0.05mm;模具上、下面的平行度要求,并指出由装配决定的尺寸和对该尺寸的要求;模具使用、装拆方法的要求;防氧化处理、模具编号、刻字、标记、油封、保管等要求;有关试模及检验方面的要求。

⑤ 绘制全部零件图。由模具总装图拆画零件图的顺序应为:先内后外;先复杂后简单;先成型零件,后结构零件。一定要按比例画,允许放大或缩小。视图选择合理,投影正确,布置得当。

标注尺寸要求统一、集中、有序、完整。标注尺寸的顺序为:先标主要零件尺寸和出模斜度,再标注配合尺寸,最后标注全部尺寸。在非主要零件图上先标注配合尺寸,后标注全部尺寸。把应用最多的一种粗糙度标于图纸右上角,其他粗糙度符号在零件各表面分别标出。零件名称、模具图号、材料牌号、热处理和硬度要求、表面处理、图形比例、自由尺寸的加工精度、技术说明等都要正确填写。

⑥ 校对。自我校对的内容是:模具及其零件的材质、硬度、尺寸精度、结构等是否符合塑件图纸的要求;塑料的流动、缩孔、熔接痕、脱模斜度等是否影响塑料制件的使用性能、尺寸精度、表面质量等;图案设计有无不足,加工是否简单,成型材料的收缩率选用是否正确;注射量、注射压力、锁模力够不够,模具的安装、脱模有无问题;分型面位置及其加工精度是否满足需要,会不会发生溢料,开模后是否能保证塑料制件留在有顶出装置的模具一边;脱模方式是否正确,推广杆、推管的大小、位置、数量是否合适,推板会不会被型芯卡住,会不会擦伤成型零件;加热器的功率、数量;冷却介质的流动线路位置、大小、数量是否合适;浇注、排气系统的位置、大小是否恰当;装配图上各模具零件安置部位是否恰当,表示得是否清楚,有无遗漏;零件图上的零件编号、名称、制作数量、零件内制还是外购的,是标准件还是非标准件,零件配合处理精度、成型塑料制件高精度尺寸处的修正加工及余量,模具零件的材料、热处理、表面处理、表面

加工精度是否标记、叙述清楚；主要零件、成型零件工作尺寸及配合尺寸；尺寸数字应正确无误，不要使生产者换算；检查全部零件图及总装图的视图位置，投影是否正确，画法是否符合制图国标，有无遗漏尺寸；所有零件的几何结构、视图画法等是否有利于加工。

⑦ 审图。原则上按设计者自我校对项目进行，但是要侧重于结构原理、工艺性能及操作安全等方面。

⑧ 描图、送晒。描图时要先消化图形，按国标要求描绘，填写全部尺寸及技术要求。描后自校并且签字。把描好的底图交设计者校对签字，然后才可送晒。

⑨ 编写制造工艺卡片。编写制造工艺卡片，并且为加工制造做好准备。在模具零件的制造过程中要加强检验，把检验的重点放在尺寸精度上。模具组装完成后，由检验员根据模具检验表进行检验，主要检验模具零件的性能情况是否良好。

⑩ 试模及修模。虽然是在选定成型材料、成型设备时，在预想的工艺条件下进行模具设计，但是人们的认识往往是不完善的，设计与实际之间往往存在差异。因此，必须在模具加工完成以后，进行试模试验，再根据成型的制件质量情况，进行排除错误性的修模。

塑件出现不良现象的原因很复杂，有模具方面的原因，也有工艺条件方面的原因。在修模前，应当根据塑件出现不良现象的实际情况，细致地进行分析研究，找出造成塑件缺陷的原因后提出补救方法。因为成型条件容易改变，所以一般的做法是先变更成型条件；当变更成型条件不能解决问题时，才考虑修理模具。一旦变更了模具条件，就不能再作大的改造和恢复原状。

#### （6）整理资料进行归档

模具经试验后，若暂不使用，则应该完全擦除脱模渣滓、灰尘、油污等，涂上黄油或其他防锈油或防锈剂保存。把从设计模具到模具加工、检验合格为止所产生的技术资料，例如，任务书、制件图、技术说明书、模具总装图、模具零件图、底图、模具设计说明书、检验记录表、试模修模记录等，按规定加以系统整理、装订、编号进行归档。这样做似乎很麻烦，但是对以后修理模具，设计新的模具都是很有用处的。

### 2. 一般塑料制品的设计原则

#### （1）零件的形状应尽量简单、合理、便于成型

- ① 在保证使用要求前提下，力求简单、便于脱模，尽量避免或减少抽芯机构。
- ② 利用转换区的方法来防止突然的尺寸变化。
- ③ 利用肋及浮凸物和铸空法使设计更合理。
- ④ 转角处用圆弧过渡。
- ⑤ 尽量让浮凸物与外壁或肋相连。
- ⑥ 如果肋本身与外壁间隔相当远，则最好加上角板。

#### （2）零件的壁厚应合理

塑料零件的壁厚取决于塑件的使用要求，太薄会造成制品的强度和刚度不足，受力后容易产生翘曲变形，成型时流动阻力大，大型复杂的零件就难以充满型腔。反之，壁厚过大，不但浪费材料，而且加长成型周期，降低生产率，还容易产生气泡、缩孔、翘曲等疵病。因此，制件设计时确定零件壁厚应注意以下几点：

- ① 在满足使用要求的前提下，尽量减小壁厚。
- ② 零件的各部位壁厚尽量均匀，以减小内应力和变形。
- ③ 承受紧固力部位必须保证压缩强度。
- ④ 避免过厚部位产生缩孔和凹陷。

### ⑤ 成型顶出时能承受冲击。

若因制件需要不同壁厚时,应逐渐过渡,不可突然加厚。如球类手柄,不应做成实体,应改为相对的两件薄壳结构,最后组合成为一体。

### (3) 设置必要的脱模斜度

为确保制件成型时能顺利脱模,设计时必须在脱模方向设置脱模斜度,其大小与塑料性能、零件的收缩率和几何形状有关。对于工程塑料的结构件来说,一般应在保证顺利脱模的前提下,尽量减小脱模斜度。具体选择时,还应注意以下几个问题:

- ① 凡塑件精度要求高时,应采用较小的脱模斜度。
- ② 凡较高、较大的尺寸,应选用较小的脱模斜度。
- ③ 塑件形状复杂的、不易脱模的应选用较大的脱模斜度。
- ④ 塑件的收缩率大的应选用较大的斜度值。
- ⑤ 塑件壁较厚时,会使成型收缩增大,脱模斜度应采用较大的数值。

⑥ 如果要求脱模后塑件保持在型芯的一边,那么塑件的内表面的脱模斜度可比外表面小;反之,要求脱模后塑件留在型腔内,则塑件外表面的脱模斜度应小于内表面;但当内外表面要求不一致时,往往不能保证壁厚的均匀。

⑦ 增强塑件宜取大,含自润滑剂等易脱模塑料可取小。

⑧ 取斜度的方向,一般地,内孔以小端为准,符合图样,斜度由扩大方向取得。外形以大端为准,符合图样,斜度由缩小方向取得。一般情况下,脱模斜度 $\alpha$ 不包括在塑件公差范围内,如图 12-27 所示。

### (4) 强度和刚度不足可考虑设计加强筋

为满足零件的使用所需的强度和刚度单用增加壁厚的办法,往往是不合理的,不仅大幅增加了零件的重量,而且易产生缩孔、凹痕等疵病,在零件设计时应考虑设置加强筋,这样,能满意地解决此类问题,以提高零件的强度,防止和避免塑料的变形和翘曲。设置加强筋的方向应与料流方向尽量保持一致,以防止充模时料流受到搅乱而降低零件的韧性或影响制件的外观质量。

加强筋在塑料部件上是不可或缺的功能部份。加强筋有效地增加产品的刚性和强度而无须大幅增加产品切面的面积,对一些经常受到压力、扭力、弯曲的塑料产品尤其适用。此外,加强筋更可充当内部流道,有助模腔充填。

加强筋一般被放在塑料产品的非接触面,其伸展方向应跟随产品最大应力和最大偏移量的方向。选择加强筋的位置亦受制于一些生产上的考虑,如模腔充填、缩水及脱模等。加强筋的长度可与产品的长度一致,两端相接产品的外壁;或只占据产品部分的长度,用以局部增加产品刚性。如果加强筋没有接上产品外壁分,末端部分亦不应突然终止,应该渐次地将高度减低,直至完结,从而减少出现困气、填充不满及烧焦痕等问题,这些问题经常发生在排气不足或封闭的位置上。而且因为缩水的问题,筋骨的厚度不能过大过平均壁厚的厚度。塑件加强筋高度通常为壁厚的 3 倍左右,并有 2~5 度的脱模斜度,与塑件壁的连接处应用圆弧连接。加强筋的厚度应为塑件平均壁厚的 0.5~0.7 倍,如果太大,容易产生瘪凹。如果要设置多个加强筋,则分布应错开,防止破裂。

### (5) 零件的所有转角尽可能设计成圆角或者用圆弧过渡

圆角可避免应力集中,提高制件强度。在零件的转角处易产生应力集中,在受力或受冲击、振动时会发生破裂,如果成型条件不当或零件结构不合理,则会产生很大的内应力,特别容易产

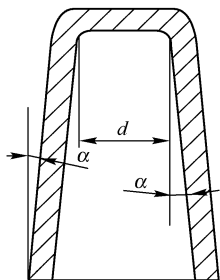


图 12-27 脱模斜度 $\alpha$

生应力开裂。当圆角半径小于零件壁厚 0.3 倍时应力集中急剧增大；当大于壁厚 0.8 倍时，应力集中明显变小，参见图 12-28。

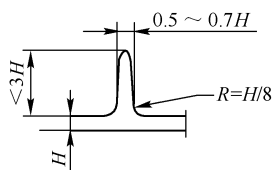


图 12-28 圆弧过渡

圆角有利于充模和脱模。对于一些流动性差的塑料或加入填料的塑料，零件设计成圆角尤为重要，不仅可改善充模性能，而且可提高零件的使用性能。

圆角有利于模具制造，提高模具强度。零件上设计了圆角，模具的对应部位也呈圆角，这就增加了模具的坚固性，模具在淬火或使用上不致因应力集中而开裂，因而也增加了模具的强度。

#### (6) 尺寸公差

影响塑料零件尺寸精度的因素很多而且十分复杂，归纳起来主要有以下几方面：

① 塑料原料本身的特性。一般结晶型和半结晶型的塑料的收缩率比无定型的大，范围也宽，因此零件尺寸精度也就有差异。

② 成型工艺条件。如料温、模温、注射压力、保压压力、塑化背压、注射速度、成型周期等都会影响成型收缩率的大小和波动范围。

③ 模具的结构，如分型面的选择、浇注系统的设计、排气、模具的冷却和加热以及模具的刚度等都会影响零件的尺寸精度。

④ 模具在使用过程中的磨损和模具导向部件的磨损也会直接影响零件的尺寸精度。

因此，在制件设计中正确合理地确定尺寸公差是非常重要的。对于工程塑料制件、尤其是以塑代钢的制件，设计者往往简单地套用机械零件的尺寸公差，这是很不合理的。我国于 1993 年发布了 GB/T14486—1993《工程塑料 模塑塑料件尺寸公差》，设计者可根据所用的塑料原料和零件使用要求，根据标准中的规定确定零件的尺寸公差。

一般热塑性制品的商业许可公差为  $\pm 0.5\%$ ；而高收缩性材料的收缩率达到  $2\% \sim 3\%$ 。所以对于高收缩性材料必须指定较大公差，因为其尺寸公差很难藉模具设计予以补救。产品设计者在选定尺寸公差时要考虑使用的塑料材料、产品形状及将来的使用条件等。随着公差的严格要求，其制造加工精度与模具价格亦相对提高。因此，产品设计者于图面上记入公差时，要审慎设定适用于此公差的使用条件。

塑料零件除了尺寸公差以外，对于一些精密成型制作更须考虑形状公差，因为浇口的种类、位置或模具温度调节系统，皆须根据这些资料来设计。

#### (7) 尺寸及表面粗糙度

尺寸主要满足使用要求及安装要求，同时也要考虑模具的加工制造、设备的性能，还要考虑塑料的流动性。表面粗糙度由模具表面的粗糙度决定，故一般模具表面要研磨抛光，模具型腔与型芯的表面光洁度要一致。

#### (8) 支承面和孔（槽）

塑件一般不以整个平面作为支承面，而代之以边框、底脚作支承。塑件的孔有三种成型加工方法：模型直接模塑出来；模塑成盲孔再钻通孔；塑件成型后再钻孔。模塑通孔长度与孔径比要小些。塑件如有侧孔或凹槽，则需要活动块或抽芯机构。

#### (9) 螺纹和嵌件

塑件中的螺纹可用模塑成型出来，或由切削方法获得。受力大的，要采用金属螺纹嵌件来成型。为了增加塑料制品整体或某一部位的强度与刚度，满足使用要求，常在塑件体内设置金属嵌件。

#### (10) 表面花纹



由于装潢或某些特殊需要,塑料制品的表面常有文字图案。如把手、旋钮凹凸纹增加摩擦力,凹凸纹要做成直纹,以便于脱模。其他花纹有皮革纹、橘皮纹、点格纹、菱形纹等,加工方法有电火花加工、照相化学磨蚀和雕刻冷挤压等。

### 3. 超声波焊接塑料件的设计要点

#### (1) 斜面接合设计要点

① 接合部的倾斜角度越大则焊接面积也就越大,但由于结合面不易产生滑动,故需要较大的能源。另一方面,当倾斜角为锐角时,在焊接时会形成压入状态,并因打开接合部而引起变形、降低融化密合性等,有可能引起不良问题的发生。

② 将要进行焊接的成型品在组合时,纵向与横向的设定标准为  $0.4 \sim 0.7 \text{ mm}$ 。

③ 为了确保焊接时嵌接状态的稳定性,尽可能地将接合部设计大一点。单侧设定为  $0.05 \text{ mm}$  左右为最佳。

④ 为了达到焊接后的制品尺寸(进入量)的稳定,必须设有浇口塞。设定位置为可软化焊接的位置。

⑤ 若想防止在焊接时发生融化飞边,最好设有飞边滞留。

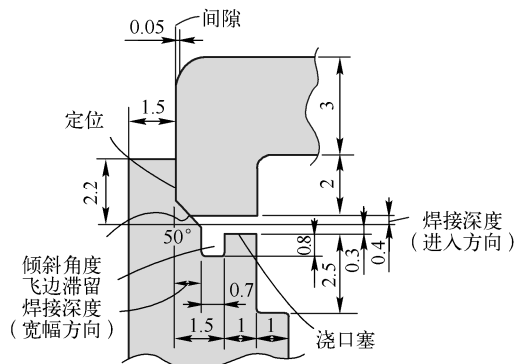


图 12-29 斜面接合设计案例

#### (2) 逐次接合设计要点

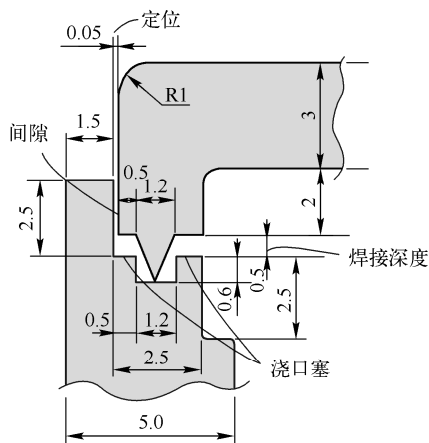
倾斜部分的焊接深度一般为纵向  $1.0 \sim 1.2 \text{ mm}$ , 横向  $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$  左右。当纵向的焊接深度发生变化时其焊接强度也会发生变化,焊接量过大则在焊接时容易产生飞边,由此引发出破裂、气密不良等问题。

#### (3) 能源定向接合设计要点

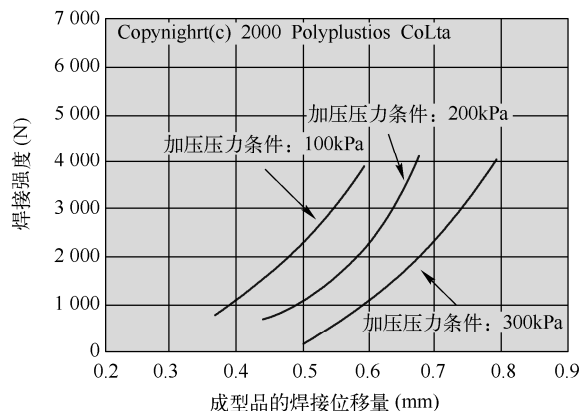
① 接合部的三角形凸起部分为正三角形或等边三角形,前端部的角度设定为  $60^\circ \sim 90^\circ$  左右为最佳。焊接量的高度方向尺寸与设定角度有关,一般在  $0.5 \text{ mm}$  左右。

② 防止熔化引起飞边外露的沟槽必须大于焊接时被软化的三角形凸起部分。此时,三角形的凸起高度为沟槽深度+焊接深度。

图 12-30 为代表性的能源定向接合设计举例,以及该接合形状的焊接强度。



(a) 设计举例



(b) 焊接强度

图 12-30 能源定向接合设计以及该接合形状的焊接强度

#### (4) 成型品的设计

① 接合部的形状。接合部的形状以圆形为最佳。一定要设计成角形或异形形状时,则各边缘倒角,应尽可能地设计成对称形状。

② 传递距离。到焊接部的距离越短,焊接能源的损失就越小,可进行良好的焊接作业。

③ 与圆柱形工具相接触的成型品。与圆柱形工具相接触的成型品,尽可能轻,且形状简单。当与圆柱形工具相接触的成型品含有金属嵌件、轮毂等附件时,因焊接能源传递不及时,很容易导致焊接不良。有时还会因共振造成金属嵌件部分的熔化,轮毂等凸出部分发生破裂。所以,凸出部分、嵌件等必须放在固定的夹具上,在万不得已的情况下,倒  $R$  角等以增大制品的强度。

④ 圆柱形工具的接触面。将圆柱形工具的接触面及接合面设计为平面。若设计为阶梯形的话,则会引发焊接能源的传递不均匀,容易造成焊接不良。

#### 12.2.1.5 电子设备结构设计的步骤

电子设备整机结构设计牵涉面广,要解决的矛盾很多,往往是边分析边设计,边设计边调整,直到符合要求为止。

##### (1) 熟悉设备的技术指标和使用条件

设计人员接到设计任务后,应详细了解设备的各项技术指标、设备需要完成的功能以及其他特殊要求(体积、重量的限制等)、设备工作时的环境气候条件、机械条件和运输、储存条件等。

##### (2) 确定结构方案

根据设备的电原理方框图合理作出结构方框图,即将设备划分为若干个分机,如果设备较简单也可划分为几个单元或部分。划分时应确定各分机(单元)的输入、输出端;分清高频、高压,选择可靠的机、电连接方案。此外,还要对通风散热、重心分配、操作使用以及制造工艺等问题作综合考虑。

在划分分机(单元)时,电气设计人员应与结构设计人员密切配合,得出一个最佳的划分分机(单元)方案。

##### (3) 确定机箱机柜的尺寸和所用材料

首先应决定机箱(机柜)内部零部件需要的空间,用多少插件、多少插箱,然后算出总的外形尺寸。有时也可能先给外形尺寸,这时内部尺寸就应服从外形尺寸。外形尺寸应符合国家标准 GB3047.1—86 及部标有关规定。

根据国家标准 GB3047.1—86(面板、架和柜的基本尺寸系列),电子设备的尺寸分为两类:第一类是根据电力、电信等系统现行情况制定的。其主要特征是面板高度进制为 20mm(即是 20 的倍数),所以称为模数的基本尺寸系列。第二类是电子、核电子等系统采用 IEC 有关标准制订的,与 IEC297—1, IEC297—2 号标准相对应,其主要特征是面板宽度以 482.6mm(19 英寸)为准,面板、插件箱高度进制为 44.45mm(1.75 英寸),插件箱面板定度分两种系列,一种为 5.08mm(0.2 英寸)系列,另一种为 17.2mm 系列。

在设计机箱、机架、机柜和插件箱时,必须符合规定的标准。根据标准系列来确定主要结构尺寸,有利于成批生产,可缩短设备的试制周期和生产周期;有利于实现标准化、规格化、系列化,可以扩大产品的适应性,便于实现电子设备机箱、机柜的专业化生产。

根据设备的重量与使用条件,选用机箱、机柜的材料。在选用有关材料时,应对其特点、性能有所了解,以便结合实际情况选用。常用的材料有钢、铝型材、塑料等。

## 12.2.2 组件结构设计

### 12.2.2.1 机箱设计

机箱是安装和保护电子设备内部各种电路单元、元器件及机械零部件的重要结构,对于消除各种复杂环境对设备的干扰,保证设备安全、稳定、可靠地工作,提高设备的使用效率、寿命,以及增强设备安装、维修的方便等起着非常重要的作用。机箱作为电子设备一个重要的基础结构,其设计也是整个电子设备结构设计的重要内容之一,现已成为实现电子设备技术指标的重要环节。

机箱外形往往为矩形六面体,形成一个完整的外壳。一般由机箱框架、上下盖板、前后面板、左右侧板组成。也可以不用框架,直接由薄板经折弯而成。把电子元、器件均布置在一个机箱(或几个机箱)内,使之具有体积小、重量轻、使用方便等优点,通常用于尺寸较小和结构简单的中、小型电子设备,

机箱框架是机箱的承载部分,所有插件、底板、面板、盖板等都固定在框架上面,因此其强度、刚度对整台设备工作的安全可靠影响极大。组合安装,可以由横梁、立柱组成前后围框(或为整板),然后再与侧梁连接组成机箱框架;也可以由侧架立柱组成左右围框(或整板),然后与横梁连接组成机箱框架。常见的机箱结构有钣金结构机箱、铝型材机箱、铸造结构机箱、焊接结构机箱、塑料机箱等。

#### 1. 钣金结构机箱

钣金结构主要利用薄钢板经过折弯再进行焊接或用螺钉连接,构成一个完整的机箱。这种结构的优点:可以设计成各种形式及尺寸,灵活多样,且用料品种少,生产周期短;机箱有一定的强度和刚度。缺点:机箱的外形尺寸公差大,不宜于批量生产;必须有一定的工装模具。

设计钣金结构机箱时,要注意以下几个问题:

(1) 弯曲圆角半径 这里的圆角半径是指内缘半径。圆角半径过小则容易引发裂纹,圆角半径过大则容易引起回弹,而使得设计的弯曲圆角和半径尺寸得不到保证。不同的材料有不同的最小弯曲半径,半径的设计要以此为依据。对形状近于对称的机箱,两边的圆角半径尽量一致,以免弯曲时板料因受力不均而滑动。有时为了装配需要,机箱会带有翻边,此时,应采用具有一定半径的弯边代替过急的折角。

(2) 回弹 又叫回跳。由于弯曲过程包括塑性与弹性变形两个过程,因此,回弹是不可避免的。设计时,应制定合理的弯曲公差,太严的公差只能靠整形工序予以保证,或者用加强筋来抑制回弹,予以定形,或者通过改进模具结构来减弱回弹。

(3) 弯曲形状 机箱形状与尺寸应尽量对称,这样可以防止弯曲过程中因受力不均匀、坯料发生滑移而影响弯曲精度,而且模具的寿命也长。

(4) 单边弯曲高度尺寸 钣金结构中,单边弯曲能起到加强筋的作用,有时甚至能安装电子元器件,单边弯曲高度值问题常常为设计人员所忽视。在弯曲圆角半径确定的前提下,其单边弯曲高度值有一极限值,过小则在普通折弯机上无法实现,必须设计专用模具,从而增加加工成本。通常最小单边弯曲高度为最小弯曲半径加两倍材料厚度。

(5) 设计定位孔 为保证机箱在弯曲时不会移动,常须开设定位孔,因此,机箱设计时要充分考虑定位孔,并为其留好位置。

(6) 尺寸标注及公差的合理标注 机箱中的有些位置尺寸,如果标注不当往往会影响机箱弯曲后的质量,通常以机箱弯曲成型后的开放边为基准来标注相关位置尺寸。尺寸公差也是值得

注意的问题，公差等级过高则增加成本，甚至无法实现，过小则影响设备的整机装配。具体的公差精度要视设备结构的复杂程度而定。

## 2. 铝型材结构机箱

铝型材结构机箱就是利用各种截面形状的铝型材弯曲成机箱的围框，在围框外面覆以铝板（可以采用冲裁、弯曲或机加工制成），并借助铆钉或螺钉连接组装成机箱的。这种机箱结构简单，变化灵活，内部结构易于处理，并且具有足够的强度和较好的刚度，加工工艺简单，生产周期短，而且机箱外形容易实现美观要求，故它被广泛用于新产品的研制和批量生产，目前主要用于民用电子设备以及军用电子仪器、仪表中。

铝型材机箱结构类型很多，常用的有以下几种：

### （1）铝型材围框结构机箱

铝型材围框结构机箱，是采用折弯方式首先将型材做成两个围框，再用铝型材腰带等辅助型材组成整机框架机箱。这种结构形式又可分为前后围框和左右围框两种结构。

① 前后围框结构机箱。它是指用铝型材弯制成前后两个围框，再用铝型材腰带支撑为侧梁组成机箱框架。

② 左右围框结构机箱。它是指将型材弯制成左右两侧围框，并与侧板连接后制成左右侧壁。机箱的前部采用上下横梁搭接，后部采用后壁板或型板搭接，构成整机的主要结构框架。围框机箱有一定的强度，结构上变化灵活，工艺简单，便于批量生产，上下盖板拆卸方便，便于装配、调试、维修。缺点：围框与盖板、面板的配合不易作到紧密吻合。

### （2）型板结构机箱

型板是具有形状特征的铝型材。利用型板作为机箱框架的侧面（也可为前后面），再用铝型材横梁与侧面板连接，并采用插入式上盖板。具有结构合理、造型新颖、强度和刚度较高、机加工量小和工艺简单、便于装配和维修等方面特点。但机箱高度方向的尺寸受到型板尺寸的限制，故一般做成扁平形状的机箱。

### （3）型材组合结构机箱

型材组合结构机箱是采用多种断面几何形状的铝型材，针对不同的机箱结构尺寸要求，组合相拼而成的机箱。机箱横梁、侧梁和立柱采用三种不同截面的铝型材组装而成，每种铝型材内有T型槽，内装方螺母，用以固定机箱内的各个构体（如底板、搁架等）。

用型材组合结构制成的机箱，其外形尺寸组合方便、装配简便、用途广，可组合成台式、装架式机箱及插箱，多用于多品种、小批量、周期短的产品。但切削加工量较大，型材尺寸精度要求高，对批量较大的产品在应用上受到一定的限制。

## 3. 铸造结构机箱

军用电子设备通常需要有“三防”功能，设备必须采用密封机箱，此时，可采用铸造结构或焊接结构机箱。铸造工艺可制成结构复杂且不对称的机箱。随着精密铸造技术的迅速发展，铸造精度能达到IT10~IT11级，表面粗糙度可达Ra6.3~0.8 $\mu\text{m}$ 。

设计铸造结构机箱应注意以下几个问题：

（1）结构最优化 铸件的优点在于允许零件具有复杂的形状，这种复杂形状可能是为了外形美观，为了合理利用材料，为了满足机箱的强度、刚度，或是为了设备的装配需要，设计人员应充分利用铸件的这一特点，在机箱的实用（满足性能）、美观、经济三者之间寻求最佳的平衡点，力求使机箱结构的设计最优化。

（2）箱体壁厚的确定 从节约材料、减轻设备重量的角度考虑，机箱壁越薄越好；从铸造

工性考虑,薄壁结构铸造难度大、成本高。机箱壁太厚则流动性差,且容易形成气泡、缩孔等铸造缺陷,成本也高。因而,在决定机箱壁厚时,要从箱体大小、结构形式、铸造方法、材料、加工成本等多角度综合考虑。

(3) 机箱各连接处的过渡设计 机箱两个表面的连接处是铸造机箱结构设计重点。在两个表面连接处,铸造金属不均匀地聚积会导致机箱内部冷却的不均匀,它是缩孔、缩松、内应力、裂纹等铸造缺陷产生的根源。因此,机箱的任何两个平面之间都应避免尖角相连,而应采用圆角过渡,而且尽可能用同一圆角。当两个平面壁厚相差很大,而又难以避免时,应设计坡度圆角过渡区,或设计加强筋来加强等。

(4) 角部的圆角度确定 机箱各角部合适的圆角度是铸造结构的基本特征。圆角过小,容易产生内应力,并导致裂纹。圆角过大,则角部积聚的金属较多,容易引起缩孔等缺陷。通常取两连接壁厚算术平均值的0.2~0.4倍。

(5) 壁间连接圆角的确定 如果两壁厚相差不大,则内圆角取两壁厚平均值的1/6~1/3。

(6) 筋的设计 有时为了机箱的强度、刚度,需要设计加强筋,有时甚至利用加强筋来安装零件、元器件等。但是,在机箱外缘和拐角处不能设计加强筋,否则会产生局部应力而使金属破坏,产生裂纹。筋的厚度通常取壁厚的0.7~0.9倍,筋的高度要小于5倍壁厚。

(7) 结构斜度 为便于起模,在机箱上垂直于分型面的不加工表面要设计有一定的斜度,这一斜度就叫结构斜度,结构斜度要在零件图上标注。值得注意的是结构斜度与拔模斜度是有区别的,拔模斜度是铸造工艺斜度,不能混淆。

(8) 结构设计要考虑型芯因素 机箱的结构设计,要尽量做到少用甚至不用型芯。如果必须要用型芯,应采取相应措施,以便牢固地支持型芯,以保证浇铸时型芯的稳定性,还要注意能方便地清除型芯。

铸造结构机箱具有生产率高、刚度和强度高、成本低等特点,但由于是整体机箱,可能会给设备维修带来不便,而且机箱外形还需要二次加工才能完成,故通常用于小批量生产。当设备批量很大时,可采用压铸工艺方法,压铸结构机箱具有铸造结构机箱的所有优点,比铸造结构机箱组织致密,其防水性能、尺寸精度进一步提高,机箱外形一次成型,而且可以满足机箱的各种造型需要;这种机箱需要专用设备,而且加工复杂,一次性投资比较大。

#### 4. 焊接结构机箱

焊接就是利用加热或加压等手段,使分离的金属材料牢固地连接在一起的一种工艺方法。设计焊接结构机箱时首先要考虑以下几个问题。

##### (1) 材料的焊接性能

焊接性能是指在一定的焊接工艺方法、工艺参数及结构形式条件下,获得优质焊接接头的难易程度。众所周知,并非所有的材料都可以焊接,可焊接的材料中也并非都有很好的焊接性能。因而,在满足设备使用性能要求的前提下,应选用焊接性能较好的材料。当然,可焊接性能,与所采用的焊接方法是密切相关的。

##### (2) 结构刚度

合理布置箱体各焊接零件的相互位置,以保证箱体焊接的结构刚度。

##### (3) 应力集中

焊接结构截面变化大、过渡区较陡,如果设计不当,会引起应力集中,从而导致结构破损和早期失效。

基于以上认识,设计焊接结构机箱时,在选好所用材料后,应着重考虑解决以下几个问题。

① 合理选择焊接接头,这是设计焊接结构首先需要确定的问题。焊接接头通常有 I 型、Y 型、U 型、V 型、双 Y 型、双 U 型、双 V 型以及锁边坡口等几种,具体的接头形式应视所用材料及具体结构而定。

② 尽量减少焊缝金属的填充量。填充量少,成本低,箱体受焊接过程影响小。

③ 合理布置焊缝。焊缝布置合理,则可减少热变形和热应力,防止局部过热,从而保证焊接质量。设计焊缝时,应尽量设计为对称布置。值得注意的是,焊缝的布置应便于在焊接前采用点焊的办法,将整个机箱先连成一体,而且,焊缝的位置要便于施焊,否则将会影响焊接质量。

④ 尽量避免和减少应力集中。由于焊缝本身是应力集中源,因此,焊接件在动载荷情况下特别容易在焊缝处产生裂纹。设计时,应尽量采用等厚度板料焊接,或加工成等厚度焊接的过渡区。

⑤ 加工区域内尽量不布置焊缝。因为先焊后加工,会削弱焊缝强度,而且加工面的质量也得不到保证。

⑥ 焊缝应避免过分集中或交叉,焊缝的数量要尽量少。

焊接结构机箱具有强度、刚度高、加工不需要特殊设备、加工技术难度较低、防水性能好、成本低(相对于压铸结构机箱而言)等特点,这种机箱适用于新品研制以及批量生产。

## 5. 塑料机箱

塑料机箱是利用工程塑料通过注塑或压塑成型而制成的机箱。所采用的工程塑料主要有 ABS、聚丙烯、聚碳酸酯、结构泡沫塑料等,具有尺寸稳定、表面光泽好、比强度和比刚度高、质量轻、易加工成型、生产效率高、耐腐蚀、成本低等诸多优点。塑料机箱能满足设备的各种造型设计要求,而且保持性好,能满足人们日益提高的审美要求。一般用于中小型、大批量的电子设备。

随着材料科学研究的不断深入,有一些工程塑料在强度、刚度方面已接近甚至超过金属;如果进一步提高工程塑料的机械稳定性、物理稳定性和化学稳定性,用工程塑料替代金属材料作为电子设备的结构件是电子设备发展的必然趋势。

### (1) 结构形式设计

① 整体全塑结构。由于不可能注塑出封闭结构,故整体全塑结构仅用于某些部件,如带印制板导轨的插件盒等。箱体采用比较经济的注塑工艺(内有装载印制板的导轨)制成的矩形筒体,三块印制板用支柱连成一体并与后盖板连接,插入机壳,即构成完整的仪器。

② 对开式结构。它由两个盒形结构相互联结构成封闭的产品外壳。在小型扁形的产品中大多采用上、下对开嵌合结构,如计算器、键盘、小型打印机、小型仪器仪表盒、幻灯机等。在竖直状态下使用的小型扁形结构采用前后对开式结构,如袖珍收音机、各种手提式仪器仪表、工具箱等。

当前注塑工艺迅速发展,比较大型的高档产品亦普遍采用对开式结构,如电视机外壳、微型计算机及计算机终端显示设备等。此类结构外形洗练、美观、大方,整个产品只有一个装配接合面。接合处的结构处理对整机外观影响很大,设计不当会给人以粗糙、低劣感,处理得好可为整机增添艺术魅力。为保证对开的两部分能正确定位,两部分应有相重叠的嵌合部分。

对开式结构的连接固定,对小型的产品外壳可用弹性嵌接结构;较大型的一般用螺钉连接;对于需要经常开启的盒盖,可一侧采用铰链结构,另一侧采用快锁连接;对于大型的可加装机械式锁定结构。

③ 组合式结构。塑料结构的模具投资很大,小批量生产是不经济的,而仪器仪表的生产批量往往不是很大,从经济效益考虑,常采用通用结构机箱,以适应多种仪器的需要。通用塑料机

箱主要是提供除前、后面板之外的壳体,一般采用组合式结构。

组合式结构中也常采用塑料制件、钣金件或型材结构混合组装构成。例如,左右侧板(或带把手)为模塑件,外加型材或钣金件组成机箱;前后围框采用塑料结构,而骨架采用钣金或型材结构;前围框与面板由整体塑料做成,其他部分用钣金或型材结构等构成。

通用组合式塑料机箱还可进一步设计成由成套的散件和组装件根据需要选择装配的结构。新产品设计师可根据提供的组装模式,按自己构思选用通用零件进行组装。这样,试装成功的同时也完成了机箱设计任务。

④ 复壁结构机箱。它采用低成本的吹塑工艺成型,如采用高抗冲击强度和温度适应范围较宽而价格适中的高密度聚乙烯,可取得较好的经济效益。

这种结构是由双层壁板组成的中空结构,内壁用来固定仪器且不影响外壁,外壁可设计得美观大方以吸引顾客。这种结构增强了刚度和强度,空气夹层具有缓冲隔层作用。机箱结构轻巧,通用性好。

#### (2) 其他设计要点

设计塑料机箱时应注意解决以下几个问题:

① 机箱壁厚的确定,壁厚取决于机箱的使用要求,即强度、刚度、结构、重量、电气性能、尺寸稳定性以及装配等各项要求,最常用的壁厚为 2~3mm,大型机箱的壁厚也可大于 6mm。机箱壁厚应尽可能均匀一致,防止在成型过程中由于不均匀的凝固与收缩,在厚壁处易产生气泡和收缩变形,在急剧过渡处因收缩应力而引起裂纹。

② 机箱内外表面相连及拐角处应用圆角过渡,若为尖角,则会产生应力集中,而影响到机箱的强度和质量,而且不便于脱模。

③ 机箱上的孔应尽可能设计在不易削弱机箱强度的地方,除相邻孔之间以及孔到边缘之间保留适当的距离,还应尽可能使有孔的部分壁厚厚一些,以防止孔眼处安装零件而破裂。

④ 机箱上的凸出部分尽量设计在机箱的拐角处,而且凸出部分的高度不要超过孔径的 2 倍,并要有足够的倾斜角以便脱模。过高的凸出部分会关住气体,使这部分的强度和密度减小。

⑤ 要设计合理的加强筋,以加强机箱的强度和刚度,防止翘曲。合理采用加强筋,还可减小壁厚,节省材料。

⑥ 要考虑机箱的脱模斜度,斜度的大小与塑料的性能、收缩率以及机箱的厚度、形状等有关,通常取  $15^{\circ} \sim 1^{\circ}$ 。

#### 6. 木料机箱

木料机箱易于加工成各种形状,表面涂覆油漆,色彩鲜艳,音响效果好,适宜制作各种音响设备。

### 12.2.2.2 机柜设计

用以组合安装设备的安装架称为机架,封闭结构的机架称为机柜。机柜框架是机柜的承载构件,所有插箱、门、面板等通过导轨、支架都固定在它上面,因此,其刚度和强度对整套设备工作的安全可靠影响极大。根据承载的大小,框架的组成可以有不同的方法,一般至少有一个或两个比较坚固的面为基础,再加上几根立柱或横梁,连接成机柜框架。

机柜、机架的结构型式很多。初期产品常用铸造或角钢经焊接和螺钉装配而成,由于结构比较笨重,铸造工艺复杂,外形简陋,现已很少采用。目前在电子设备中广泛采用的是型材结构和弯板结构的机柜、机架。

根据机柜构件的承重、材料与工艺的不同,可划分如下:

### 1. 按构件承重的不同分类

#### (1) 框架机柜

框架机柜以底座为基础构件,由立柱横梁组成机柜框架,再加盖板组成,此种结构归结为立柱承重传至底座。

#### (2) 板式机柜

板式机柜以底座为基础构件,由顶框及侧板(立柱与侧盖板合为一体)组成机柜框架,再加盖板组成。

#### (3) 条形机架(又称悬挂机架)

条形机架是由一根(或两根)具有一定截面形状的立柱为主体,再加上顶框及底座组成。顶框及底座均不承重,而由立柱承重,立柱吊挂在机房的走线架上为一个条形机架。底座部分有定位板,可以并列几个机架,并有调节螺钉,以便调整机架的垂直度。为了放置不同尺寸的插箱,在立柱的适当位置上装有带导轨的拖架,以便定位及固定。由于这种机架的标准化、通用化、系列化程度较高,且结构紧凑,便于安装、维修,因此而它在电信传输设备及微波通信设备中被列为较先进的机架。

### 2. 按承重构件的材料与工艺分

#### (1) 型材结构机柜

型材机架一般由顶框、底座和四根型材立柱组成。用做机柜的型材有钢型材和铝型材两种。

① 钢型材机柜。机柜由左右顶盖板、侧板、面板和后盖板及顶框、底座和四根两头带有法兰的同截面型材立柱与法兰焊接而成。立柱上设有标准的系列安装孔,以便安装面板、导轨等。

采用自然通风时,通常在侧板、后盖板或顶盖上开设通风孔或百叶窗。采用强制通风时,可利用侧板上的加强筋与侧板间所构成的夹层作为风道,在风道相应的位置上开进风(或出风)口,风口的大小根据所需风量确定。风道的下端或上端与风机的风口相连,也可开设独立的风道。

与外部的电气连接一般采用接线盒装置。钢型材结构的优点:结构简单,加工取材方便,有利于专业化生产和标准化、系列化;而且具有一定的刚度和强度,承载能力较大。缺点:抗扭、抗弯性能较差。

② 铝型材结构。机柜以铝或铝合金型材制成的主柱和横梁,通过焊接、铆接或螺钉连接而组成机架,再加盖板组成机柜。在铝型材立柱上,设有标准的安装孔。盖板是用薄钢板加铝型材包边而构成的,在盖板的四周边沿装有橡胶防尘圈。

这种结构的特点是切削加工少,生产率高,造型美观,强度和刚度较好,重量轻;型材结构易于标准化、通用化、系列化,利于实现专业化生产,已被推广使用。

#### (2) 弯板结构机柜

弯板结构机柜通常是用1~3mm厚的钢板折弯成一定的截面形状,作为组成机架的立柱或整板立柱、顶框、底座等;各构件的连接可以是螺钉紧固或焊接。按其结构形式,弯板结构的机柜有整板式机柜和弯板立柱式机柜两种。

① 整板式机柜。一般由1.5mm的冷轧钢板模压折弯二次成型的侧板、铸铝合金制成的顶框和底座所组成。为了防止变形,在侧板两端各加有铝型块,使侧板与顶框、底座形成实心连接。在侧板的安装柱上设有标准系列的安装孔,以便安装面板及插箱。这种结构的强度和刚度均较好,适用于重型或一般设备,但由于侧板固定,故安装维修不够方便。

② 弯板立柱式机柜。与钢型材机柜相仿,它的立柱由钢板折弯而成,其截面一般是开口的。



这种结构具有较好的强度和刚度，但截面形状复杂时加工困难，其精度不易得到保证，成本也较高。

### 12.2.2.3 插件箱设计

在机架上组合安装分机（或单元）的安装结构称为插件箱。插件箱通常由面板、底座、把手、导向定位及接插件等装置组合而成。根据其使用条件、制造方法、内部元部件的安装要求等大致可分为薄板折弯插件箱、型材弯制插件箱、薄板、型材组合插件箱和铸造插件箱。

（1）薄板折弯插件箱 通常用薄板折弯后通过点焊或螺装而成。由于制造方便、重量轻，因此较为常用。薄板折弯插件箱往往将元器件及单元盒等安装在底座上方，导线在底座下方，结构的通风散热条件较好。

（2）薄板、型材组合插件箱 薄板插件箱一般是由轧制钢板经折弯、焊接而成的。薄板与型材组合插件箱用两根型材及前、后面板构成，或用四根型材及前、后面板构成。

（3）铸造插件箱 由铝合金铸造而成，它可以是整体铸造，亦可由压铸侧板、面板、底座等组合而成。这种插件箱整体性好，适用于重型设备。

为了便于维修，插件箱与机柜一般通过导轨来连接，插件箱通过其两则的圆销挂在导轨的支承座上，且插销能在导轨上翻转。

#### 1. 底座设计

在电子设备中，底座是安装、固定和支撑各种电气元器件、机械零部件的基础结构。

##### （1）对底座的要求

① 底座机械强度及刚度要好，能稳定可靠地支撑各种零件、组件和部件，能经受大的冲击和振动。

② 对零、部、组件的排列要留出装配工具的操作空间，如上螺钉、螺母的地方，要留出螺丝刀和扳手的操作空间。

③ 孔径尺寸种类应尽可能减少。安装孔若采用椭圆形，在装配时可避免机械的二次加工。

④ 底座应具有良好的导电性能，起到电路连接的公共接地点的作用。

⑤ 加工方便，工艺性好，尽量采用标准结构。

##### （2）底座的结构形式

底座的结构形式很多，目前在电子设备中，普遍采用板料冲压折弯底座、铸造底座和塑料底座。

① 冲压底座。它采用金属薄板经落料、冲孔压弯而成型。底座重量轻、强度较好、成本低、加工方便、便于批量生产，故应用广泛。根据使用要求不同，底座可以制成整体式的，也可以先制成几个部分底座，然后再装配起来成为组合底座。

② 铸造底座。对于在底座上安装重量较大、数量较多的零件，特别是在底座上安装机械传动装置有较高的精度要求时，底座有足够的强度和刚度，保证底座在受到振动、冲击的情况下不发生变形，零、部件不发生相对位移。在这种情况下，用铸造底座比较合适。

铸造底座具有机械强度高，刚度好，具有较好的表面光洁度和尺寸精度，切削加工量较少或不需切削加工，缺点是重量大、生产成本较高。实际上，机架和底座是一起铸成的（即机架隔板、安装支架等和底座结合在一起），铸造底座的材料大多采用铸造铝合金。

③ 塑料底座。目前，塑料底座大多用在中、小型电子设备中，作为某些功能部件的底座。塑料底座重量轻，而且具有绝缘性能，有良好的机械强度，可承受一定的负荷。

## 2. 把手设计

机柜机箱的把手是为了使可动件（如盖板、面板、门、插箱及小的插件等）能方便地推入和拉出机柜机架及便于携带而采用的结构件。其结构类型很多，可根据设备的使用要求、尺寸、结构形式等特点选择相应的把手。

## 3. 限定器和定位装置设计

限定器的结构形式有单臂式、双臂式和复合式三种。单臂式限定器其结构简单，通常应用在较深的机箱中。对较浅的机箱常用双臂式限定器。复合式限定器的优点是既起铰链的作用，又起限定器的作用；缺点是需成对使用，同时在安装时要注意两只复合限定器安装位置的一致性。

为使插箱推入机柜机箱后保证接插件能顺利接合，必须有定位措施，一般用定位销来定位。定位销的长度应大于接插件的行程，首先保证定位导向，然后，接插件才能接插。此外，对于面板上带有嵌装锁的把手，为了保证锁舌能准确地进入锁紧位置，并使插箱锁紧后不能松动，有时也采用定位销来定位。

定位机构设计和制造的好坏，直接影响到接插件的使用。为保证定位准确，对定位销和销孔的配合公差和两个定位销、销孔间位置尺寸偏差都应予以恰当地选择。此外，定位销应选用耐磨材料制成。

### 12.2.2.4 导轨设计

电子设备中导轨的作用是使插件（插入单元）、插箱准确地插入机箱机柜，并保证其插头与插座很好地插接。导轨不仅起导向作用，而且还能减小插件、插箱插入或拨出的摩擦阻力。要求插箱在它上面运动时要灵活和平稳，有一定刚度，耐磨性好，导向正确，并防止运动件脱离。增加刚性的办法是加大导轨的截面。

导轨的形式很多，一般可分为滑动摩擦导轨、滚动摩擦导轨和印制板导轨结构。

（1）滑动摩擦导轨 它导轨导向精度高、强度好、结构简单、承载能力大，宽度可做得较小，但摩擦系数较大。

（2）滚动摩擦导轨 它以滚珠或圆柱做滚动件。滚珠摩擦导轨，可安装在机柜的机架上，插箱不必再加附件，结构简单，工作时插箱放在滚珠上，运转灵活，容易制作。安装在插箱侧面的滚动摩擦导轨，其导向精度高，强度好，多用于大、中型电子设备的机柜以做插箱导向之用。

（3）印制板导轨 它一般为滑动摩擦导轨。导轨与机柜架的连接一般采用螺装或挂装方式，也可采用焊接方式。有的插箱与机柜因电气连接而需用接插件，如果只靠导轨定位往往不够准确，这时可在插箱上安装定位导向销以做精确定位之用。

### 12.2.2.5 立柱、横梁、侧梁的设计

#### 1. 结构形式

（1）封闭式结构 若柱或梁的断面为封闭形，则它的强度及刚度都较大，但内壁清洗及涂覆困难，且封闭空间无法利用。这种结构常为钢或铝型材，也可用薄钢板折弯后焊接而成。

（2）开口式结构 若柱或梁的断面为开口形，则其强度与刚度较封闭式结构差。由于开口内部可以布线，因而可节省空间。这种结构常为铝型材或由薄板折弯而成。

#### 2. 设计时应考虑的问题

应根据设备所属轻、重类型及本厂加工条件来选用立柱或梁的结构形式。框架的拼装方式有下面几种。

（1）螺装 拆装方便，有利于通用化，但连接处的刚性较差。为了提高连接处的刚性，需

加某种形式的嵌角或过渡块。

(2) 焊装 加工方便,强度高,刚性好,但焊后变形较大。

(3) 粘接 用粘接剂黏合是很有前途的一种连接工艺,目前正在发展之中。

#### 12.2.2.6 面板设计

面板上主要承装操作及控制组件、指示装置、开关组件等。面板与底座、机架相联构成机柜、机箱,它起着保护和安装内部组件的作用,同时又是整个电子设备外观装饰的重要部件。

##### 1. 对面板的要求

###### (1) 对操作器件排列的要求

① 主要而常用的调节器应装置在设备的面板上,定期调节的机构安置在面板上小孔的内部,可用螺丝刀伸进小孔内进行调节。

② 应尽可能减少控制旋钮和开关的数目。

③ 旋钮和开关的配置应尽可能与设备工作时的操作顺序相适应,从左向右排列,并且和有关的指示装置设置在一起,同时还应避免操作时会挡住操作者观察指示装置的视线。

④ 形状和尺寸应根据负荷大小、运动速度、转动精度和工作环境来决定。

⑤ 对各个旋钮和开关,在面板上应标志其用途或名称。旋钮应有旋转方向指示。为了表示旋钮旋转角度,旋钮上应有标记点和标志线,在面板上也要相应地标示出最大和最小范围。

⑥ 为了不使波段开关等器件随着操作而转动,在面板背面应设定位坑,或在面板内衬板上打定位孔。

###### (2) 对指示器件排列的要求

① 面板上的指示器件,如电表、度盘、显示屏等应使操作者观察时感到清楚明确,度和数字的选择应根据人们的习惯来设计。

② 装指示器的面板应垂直于操作者的视线,或略微向上倾斜。

③ 应尽量减少指示仪表的数目,尽可能采用一个仪表指示多种性能指标。

④ 读数指示装置和电表应尽可能采用同一型号、同一形状大小,以加强协调。布置时,也应尽可能对称、整齐地配置,并水平排列,以便于眼睛左右运动。

###### (3) 对面板材料的要求

面板必须有足够的刚度和强度,与插箱、插件和机箱的连接要可靠,并且易于拆卸,在有些情况下,还要求便于密封。

##### 2. 面板的结构形式

###### (1) 板料面板

目前电子设备常取铝合金板做面板,因为它重量轻,同时又有一定的强度、刚度;机加工性能好,表面装饰性处理方便。为增加其刚度或其他要求(密封或外形要求),四周边缘可设有边框。板料面板又可分为如下两种形式:

① 组合面板。由安装板和附面板组成。安装板主要是安装固定元、器件并承受其负荷;附面板仅起文字说明和装饰作用。附面板上所需说明的文字或符号,可用腐蚀法在铝板上加工出所需字符;亦可在塑料贴面铝板上印字。

② 单一面板。面板上所需标注的文字及符号说明直接标示在安装面板上。

###### (2) 铸造面板

对于大中型设备或有密封要求和承受负荷较大的面板常采用铸造面板,其材料一般为铝合

金。雷达显示机柜、机箱上的面板常用此结构。

### (3) 注塑面板

用注塑成型的办法可制成凹凸不平、立体感很强的面板，宜于大批量生产，如收音机、电视机等家用电器和批量大的仪器仪表的面板等。

### (4) 薄膜面板

薄膜面板是一种由弹性薄膜加工而成的具有一定功能字符指示的装饰性面板，具有防水、防尘、耐摩擦、不褪色等优点，目前广泛用于家用电器、通信设备、仪器仪表、工业控制等领域。

① 薄膜面板的印刷工艺分为正面和反面印刷，分别应用于不同材质和类型的薄膜面板上。大致可以分为平面类和压鼓类。平面类薄膜面板是最简单的面板类型，主要是用不同颜色的文字、线条、色块对各个功能部位加以指示或加以区分，用户可以根据自身的需要来选择不同的薄膜材料及双面胶。

压鼓类薄膜面板是在平面型薄膜面板的基础上，通过一种压制模具，将面板经过热压后使按键部位微微凸起形成立体按键。这种立体键不仅能准确地给定键体的范围，提高辨认速度，使操作者的触觉比较敏感，同时还增进了产品外观的装饰效果。

② 薄膜面板的用材。适合于制作面板层的薄膜材料，按照其种类通常可以分为 PC、PVC、PET 三种；按照其表面状态又可以分为砂面（半透明膜）与光面（透明膜）。

PC 材料的物理特性与化学特性的综合指标较好，适应的油墨也较广泛，是薄膜开关面板层应用最为普遍的材料。PC 材料有砂面与光面之区分，选择砂面状材料的理由是因为薄膜开关的使用多是电子整机产品，作为操纵控制系统的面板不希望受光线的干扰，而砂面状的表面只呈漫反射状，不会产生明亮的反光；同时，由于表面呈紊乱的砂粒状，具有掩蔽划痕的作用。与之相反，光面材料就不具备以上特点。但是光面材料，一经在背面印刷后，色彩就会显得更为鲜艳夺目，在装饰性要求较强且又不需经常触动的场合，往往选择光面材料制作面板；或者由于某些显示区域如 LCD 液晶显示屏的特殊需要而考虑，选用光面材料较为有利。

PVC 薄膜材料的价格较低，约为 PC 材料的二分之一。在生产民用普及型的产品时，如果选择 PVC 材料，可降低生产成本，同时 PVC 材料的延展性较好，可采用冷压加工立体的图文。光面 PVC 板材一般的厚度在 0.5mm 以上，两面均有 PET 或水胶纸保护，大部分用于制作装饰性的面板；砂面的 PVC 材料一般厚度在 0.3mm 以下，它一般以定尺的片材供应，没有卷材。

因 PET 薄膜一般性能均能被 PC 薄膜所取代，故用于面板材料的情况并不太多，除非在某些特殊的场合，诸如对绝缘、回弹、耐溶剂性等其他薄膜不能满足的情况下才有少量的应用。PET 薄膜，一般都是光面透明膜；也有砂面的制品，如日本 Kimoto 公司的 KB 产品，但砂面很细，不及 PC 的砂面那样明显。英国 Autotype 公司有纹理的聚酯片，是一种涂层膜。涂层膜多以定尺的片材供应，但其价格较砂面 PC 约高 3~5 倍。

③ 面板材料的厚度选择。作为薄膜开关的面板层，考虑到它的回弹性能、疲劳寿命、敏感性等因素，厚度通常为 0.175mm，用户可以根据产品的特征，在适当的幅度内根据需要进行调整。面板层过薄，回弹无力，立体成型不够明显，在较大面积的情况下，更难以保持平整；面板层过厚，手感迟钝，操作力度增加。

对于某些需要将指示装置和传动部件一起装在面板内侧的场合，则可在面板上开设观察孔并装上透明的固定盖。面板上的把手到面板的垂直距离一般应大于面板上旋钮和指示装置的高度，以保护面板上的零件免受损坏，同时也便于操作和维修。

### 12.2.2.7 观察窗的设计

对于有防尘、密封、屏蔽及保温要求的电子产品,一般采用闭式结构。需了解其内部工作情况或观察设于内部的面板时,常在门上、侧板上或设备的上盖开观察孔,安装观察窗。观察窗一般用有机玻璃或其他透明物体加装饰框组成,也有的仅用透明物体加安装结构组成。对于只需粗略知道内部工作情况者可用茶色有机玻璃;对于必须清楚显示内部情况的可用浅茶、浅红色或无色透明有机玻璃。

#### 1. 定式观察窗

最简单的观察窗是用一块平板形有机玻璃直接固定于观察孔内侧。这种结构使观察孔边缘的加工缺陷暴露无遗,而且螺钉头外露,影响外观。

就闭式机柜而言,柜内的控制及显示面板需经常观察,于是在门上开观察窗。由于前门是整机的主要观赏面,加上观察窗的设置部位及其功能,决定了它是外观造型的核心部位。为避免其他杂物对观察的干扰及美化外观的需要,观察玻璃内侧宜加遮光罩。

#### 2. 活动式观察窗

(1) 移动式观察窗 观察窗(门)可沿导轨移动而进行启闭。

(2) 可卸式观察罩 用小型的有机玻璃做观察罩,操作时可将罩卸下。

(3) 旋转式观察窗(门) 用旋转式观察窗代替固定式观察窗。当需对机内控制面板进行操作调整时,可不必打开大的柜门,仅打开观察窗即能进行调整。某些装置上的有关元器件的性能调整后,不允许触动,为运行安全而加一个观察窗进行监视,仅在维修时打开观察孔。

#### 3. 粘贴、热铆、卡装式观察窗

电子设备中的度盘,既具有显示功能,又具有装饰性,因为它往往位于产品外观的主视区。由于面积较小,往往采用粘贴、热铆、卡装三种形式的观察窗。卡装是利用塑料的弹性,将观察窗卡装在外壳或面板上。卡装结构适用于观察窗位于面板的边缘,这种连接形式是可拆的。

### 12.2.2.8 快速锁紧装置

#### 1. 快锁机构的定义

快锁机构是具有快速锁紧和快速解锁功能的一种机械结构。它是产品上用来将活动件锁紧在固定件上的可拆卸的、高效的连接机构,是具有确定相对运动的构件的组合,是无源的纯机械结构。快锁机构的两个基本功能就是快速锁紧与快速解锁,锁紧是机构的使用状态(常锁状态),解锁是为了开启、分离、拆卸。

#### 2. 快锁机构的构成

快锁机构是由经典的杠杆机构、四连杆机构、斜面机构、凸轮(曲线槽)机构、螺旋机构、弹性机构等组合而成。典型的快锁机构由下述五部分组成:

(1) 操作件 它是具有执行锁紧及解锁功能的构件。根据不同的快锁结构及操作方式,可有不同的名称,如锁把、按键(钮)、把手、手柄、扳机等。在较复杂的快锁机构中,操作件是一个部件。

(2) 锁紧件 它是具有执行锁紧功能的末端构件。对不同的快锁结构可有不同的名称,例如,锁闩、锁栓、锁舌、锁钩等。在较复杂的快锁机构中,锁紧件是一个部件。

(3) 弹力件 它是具有提供锁紧力或复位力的构件。常用的有压簧、扭簧、片簧、拉簧及弹簧钢丝等。在较复杂的快锁机构中,常设有多个弹力件。

(4) 转动件 它是具有将锁把的操作动作转化为锁紧件相应动作功能的构件, 如连杆、推杆、杠杆等。它往往是一种传动机构部件。

(5) 锁体 它是将上述各部分组装成快锁的整体, 并将快锁安装于产品的构件。锁体常由几部分组成, 分别安装在产品的固定件和活动件上, 不同快锁结构有不同的名称, 例如锁壳、锁盒、锁座、支架等。

### 3. 典型的锁紧装置

(1) 旋转式锁紧装置 通过旋转操作件(锁把)来进行解锁或锁紧。操作件在与安装表面平行的平面内旋转。

(2) 移动(拨动)式快锁机构 它通过移动或拨动操作件(锁把)进行解锁或锁紧。

(3) 按钮式快锁机构 它通过按压操作件(按钮、按键)进行解锁或锁紧。

(4) 杠杆(扳机)式快锁机构 它借助于杠杆式操作件(锁把、扳机)进行解锁或锁紧。

(5) 推拉式快锁机构 它通过对操作件的推、拉动作, 进行解锁或锁紧。

(6) 碰撞式快锁机构 它通过待锁紧的固定件与活动件的碰撞, 就能自行锁紧; 施加分离力即可使固定件与活动件分离, 是一种典型的弹性锁紧机构。它没有锁把, 活动件本身就是锁把。其主要特点是操作使用方便, 但锁紧的牢靠度略差。此类快锁应用面广, 许多已商品化, 如市售的家用“碰珠”, 亦可用于电子设备。

(7) 卡夹式快锁机构 它用(弹性)卡夹直接对物体进行锁紧(固定)。弹性卡夹材料有用金属的, 也有用工程塑料的。

(8) 形变式锁紧 它是通过使薄壁构件(工程塑料制件或钣金件)产生局部变形实现锁紧或解锁。这类锁紧机构实际上没有单独的“快锁”构件, 而是在两个可拆卸的连接构件上直接做出凸台(锁舌)和凹坑(锁槽), 二者扣合即锁紧; 用手对一个构件施力, 通过形变使凸台退出凹坑, 即行解锁。

#### 12.2.2.9 走线槽、走线带和走线架

机柜与外部的电气连接一般采用接线盒装置。机柜内各插箱间电气连接的线扎可经走线槽引至各插箱。走线槽装置可以把众多的线扎或电缆有条理地引到所需的位置。走线槽用薄钢板弯制而成或用塑料压制而成, 其截面一般为矩形。走线槽通过弯角件固定在后立柱的安装边上。如果立柱采用开口式型材, 则其纵向槽可做走线槽用。

走线带用于机柜后面与机箱之间的走线连接, 可根据需要上下调节其位置。走线架用于机柜与可翻转机箱之间的走线连接。它由支架、轴、扭簧、支臂和安装支架组成。安装支架采用普通钢板弯制, 利用扭簧使电缆拉紧。

## 第 13 章 印制基板设计制造技术

电子元器件和机电部件都有电接点，为了实现它们的电气连通，必须用导体将两个接点连接起来。互连的方法主要有两类：立体互连（如用分立导线、电缆、接插件等）与平面互连（也叫印制电路板互连，即在绝缘基板上用印制手段制出导线图形，构成电气互连的线路）。在目前的电子设备中，印制电路板互连占有主要地位。印制电路板组件（PCB）已成为电子工业的一个极其重要的基本部件。

印制电路板不但完成互连，而且为电子元器件和机电部件提供了必要的机械支撑。由于印制电路板具有统一性和互换性，因此简化了装配过程，缩短了生产周期，便于自动化生产，对于批量生产的电子设备，其优点尤为突出。电子设备的发展得益于集成电路的发展，而集成电路的发展方向将会直接影响印制电路的发展方向。例如，每块芯片或者说每个封装器件的元件数量增加很快，每单位面积内就需要有大量的连接线。这就要求导线细、间距小。而这一走向不但导致了表面组装技术的形成和发展，而且导致印制电路板干扰问题更加严重。因此，PCB 的设计制造是目前亟待解决的技术难题。

### 13.1 印制电路板设计技术

印制电路板的设计，是根据设计人员的意图，将电原理图转换成印制版图、确定加工技术要求的过程。如果印制电路板设计得当，它将具有减少干扰和提高抗扰度的优点。如果印制电路板设计不当，将使载有小功率、高精确度、快速逻辑或连接到高阻抗终端的一些导线受到寄生阻抗或介质吸收的影响，致使印制电路板发生电磁兼容性问题。

#### 13.1.1 概述

##### 13.1.1.1 印制电路板的材料

覆铜板是用减成法制造印制电路板的主要材料。所谓覆铜板，全称为覆铜箔层压板，就是经过粘接、热挤压工艺，使一定厚度的铜箔牢固地附着在绝缘基板上的板材。

##### 1. 覆铜板的组成

所用基板材料及厚度不同、铜箔与粘接剂不同，制造出来的覆铜板在性能上就有很大区别。铜箔覆在基板一面的，叫做单面覆铜板，覆在基板两面的称为双面覆铜板。

##### (1) 覆铜板的基板

高分子合成树脂和增强材料组成的绝缘层压板可以作为覆铜板的基板。合成树脂作为黏合剂，是基板的主要成分，决定基板的电气性能；增强材料一般有纸质和布质两种，决定基板的热性能和机械性能，如耐浸焊性、抗弯强度等。这些基板除了可以用来制造覆铜板，本身也是生产材料，可以作为电器产品的绝缘底板。几种常用覆铜板的基板材料及其性质如下：

- ① 酚醛树脂基板和酚醛纸基覆铜板。用酚醛树脂浸渍绝缘纸或棉纤维板，两面加无碱玻璃

布,就能制成酚醛树脂层压基板。在基板一面或两面黏合热压铜箔制成的酚醛纸基覆铜板,价格低廉,但容易吸水。吸水以后,绝缘电阻降低,受环境温度影响大。当环境温度高于  $130^{\circ}\text{C}$  时,板材的机械性能明显变差。这种覆铜板在民用或低档电子产品中广泛使用,高档电子产品或工作在恶劣环境条件和高频条件下的电子设备中极少采用。酚醛纸基铜箔板的标准厚度有  $1.0\text{mm}$ 、 $1.5\text{mm}$ 、 $2.0\text{mm}$  等几种,一般优先选用  $1.5\text{mm}$  和  $2.0\text{mm}$  厚的板材。

② 环氧树脂基板和环氧玻璃布覆铜板。纤维纸或无碱玻璃布用环氧树脂浸渍后热压而成的环氧树脂层压基板,电气性能和机械性能良好。用双氰胺作为固化剂的环氧树脂玻璃布板材,性能更好,但价格偏高;将环氧树脂和酚醛树脂混合使用制造的环氧酚醛玻璃布板材,价格降低了,质量也能达到满意。在这两种基板的一面或两面黏合热压铜箔制成的覆铜板,常用于工作在恶劣环境下的电子产品和高频电路中。两者在机械加工、尺寸稳定、绝缘、防潮、耐高温等方面的性能指标相比,前者更好一些。直接观察两者,前者的透明度较好。这两种板材的厚度规格较多, $1.0\text{mm}$  和  $1.5\text{mm}$  厚的是制造印制电路板最常用的。

③ 聚四氟乙烯基板和聚四氟乙烯玻璃布覆铜板。用无碱玻璃布浸渍聚四氟乙烯分散乳液后热压制成的层压基板,是一种高度绝缘、耐高温的新型材料。把经过氧化处理的铜箔黏合、热压到这种基板上制成的覆铜板,可以在很宽的温度范围 ( $-230\sim+260^{\circ}\text{C}$ ) 内工作,间断工作的温度上限甚至达到  $300^{\circ}\text{C}$ 。这种高性能的板材介质损耗小,频率特性好,耐潮湿和耐浸焊性好、化学稳定性和抗剥强度高,主要用来制造超高频(微波)电子产品、特殊电子仪器和军工产品的印制电路板。但它的成本较高,刚性较差。

此外,常见的覆铜板材还有聚苯乙烯覆铜板和柔性聚酰亚胺覆铜板等品种。

### (2) 铜箔

铜箔是制造覆铜板的关键材料,必须有较高的导电率及良好的焊接性。铜箔质量直接影响覆铜板的性能。要求铜箔表面不得有划痕、砂眼和皱折,金属纯度不低于  $99.8\%$ ,厚度误差不大于  $\pm 5\mu\text{m}$ 。目前普遍使用的是  $35\mu\text{m}$  厚度的铜箔。铜箔可通过压延法和电解法两种方法制造,后者易于获得表面光洁、无皱折、厚度均匀、纯度高、无机械划痕的高质量铜箔。

### (3) 黏合剂

铜箔能否牢固地附着在基板上,黏合剂是重要因素。覆铜板的抗剥强度主要取决于黏合剂的性能。常用的覆铜板黏合剂有酚醛树脂、环氧树脂、聚四氟乙烯和聚酰亚胺等。

## 2. 覆铜板的生产工艺流程

铜箔氧化,使零价铜变为二价氧化铜或一价氧化亚铜,可以提高它与基板的黏合力。对氧化后的铜箔,在其粗糙面上胶,然后放入烘箱使之预固化;玻璃布(或纤维纸)预先浸渍树脂并烘烤,也使其处于半固化状态。最后,再将处于半固化状态的涂了胶的铜箔与玻璃布(或纤维纸)对贴,根据基板厚度要求选择玻璃布(或纤维纸)层的数量,按尺寸剪切后进行压制。压制中使用蒸汽或电加热,使半固化的黏结剂彻底固化,铜箔与基板牢固地黏合成一体,冷却后即成为覆铜板。覆铜板的生产工艺流程如图 13-1 所示。

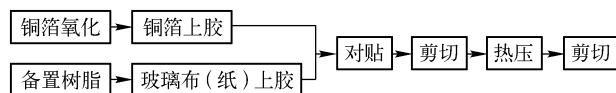


图 13-1 覆铜板的生产工艺流程

## 3. 覆铜板的非电技术指标

覆铜板质量的优劣,直接影响印制电路板的质量。衡量覆铜板质量的主要技术指标有电气性



能和非电性能两类。电气性能包括工作频率、介电性能（介质损耗）、表面电阻、绝缘电阻和耐压强度等几项；非电技术指标包括抗剥强度、翘曲度、抗弯强度和耐浸焊性等。

(1) 抗剥强度 指使单位宽度的铜箔剥离基板所需要的最小力，用这个指标来衡量铜箔与基板之间的结合强度，单位为  $\text{kgf/cm}$ 。在常温下，普通覆铜板的抗剥强度应该在  $1.2\text{kgf/cm}$  以上。目前，国内生产的环氧酚醛玻璃布覆铜板的抗剥强度可达到  $2.3\text{kgf/cm}$ 。这项指标主要取决于黏合剂的性能、铜箔的表面处理和制造工艺质量。

(2) 翘曲度 指单位长度上的翘曲（弓曲或扭曲）值，这是衡量覆铜板相对于平面的平直度指标。由于国内各生产厂家的试验、测试方法不同，所取试样的尺寸不同，故尚无统一的标准。覆铜板的翘曲度取决于基板材料和板材厚度。目前以环氧酚醛玻璃布覆铜板的质量为最好。同样材料的翘曲度，双面覆铜板比单面板小，厚的比薄的小。在制作较大面积的印制板时，应该注意这一指标。如果翘曲度大，则不仅印制板的外观不佳，还可能导致严重的问题：把电路板装入电子产品的机壳时，紧固电路板的矫正力会引起电路的插接部分接触不良、甚至使元器件受到机械损伤或开焊。

(3) 抗弯强度 它是表征覆铜板所能承受弯曲力能力的指标，以单位面积所受的力来计算，其单位为  $\text{kgf/cm}^2$ 。这项指标主要取决于覆铜板的基板材料及厚度。在同样厚度下，环氧酚醛玻璃布层压板的抗弯强度大约为酚醛纸质板的 30 倍左右。相同材料的板材，厚度越大则抗弯强度越高。在确定印制板厚度时应考虑这一指标。

(4) 耐浸焊性 指覆铜板置入一定温度的熔融焊料中停留一段时间（大约 13s）后，所能承受的铜箔抗剥能力。这项指标取决于基板材料和黏合剂，对印制电路板的质量影响很大。一般要求覆铜板经过焊接不起泡、不分层。如果耐浸焊性差，印制板在经过多次焊接时，将可能使铜箔焊盘或线条脱落。环氧酚醛玻璃布覆铜板能在  $260^\circ\text{C}$  的熔锡中停放 180~240s 而不出现起泡和分层现象。

除了上述几项以外，衡量覆铜板质量的非电技术指标还有表面平整度、光滑度、坑深、耐化学溶剂侵蚀等多项。

#### 4. 几种常用覆铜板的性能特点（见表 13-1）

表 13-1 几种常用覆铜板的性能特点

品 种	标称厚度 (mm)	铜箔厚度 ( $\mu\text{m}$ )	性 能 特 点	典 型 应 用
酚醛纸基覆铜板	1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.2, 6.4	50~70	价格低，易吸水，不耐高温，阻燃性差	中、低档消费类电子产品
环氧纸基覆铜板	同上	35~70	价格高于酚醛纸基板，机械强度、耐高温和耐潮湿较好	工作环境好的仪器仪表和中、高档消费类电子产品
环氧玻璃布覆铜板	0.2, 0.3, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5, 6.4	35~50	价格较高，基板性能优于酚醛纸板且透明	工业装备或计算机等高档电子产品
聚四氟乙烯玻璃布覆铜板	0.25, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.5, 2	35~50	价格高，介电性能好，耐高温，耐腐蚀	超高频（微波）、航空航天和军工产品
聚酰亚胺覆铜板	0.2, 0.5, 0.8, 1.2, 1.6, 2	35	重量轻，用于制造挠性印制电路板	工业装备或消费类电子产品，如计算机、仪器仪表等

#### 5. SMT 技术的新型基板材料

采用 SMT 工艺的印制电路基板，适应布线的细密化是主要的技术要求。造成布线细密化的原因有两个：大规模集成电路电极引脚的间距日趋缩小；元器件在印制板上装配的高度密集，使

PCB 的布线越来越密。这些发展都要求基板材料有更好的机械性能、电性能和热性能。

由于元器件在板上的散热量增多, 酚醛纸基板或环氧玻璃布基板散热性能差成为明显的缺点; 而采用金属芯印制板能够解决这个问题。金属芯印制板, 就是用一块厚度适当的金属板代替环氧玻璃布基板, 经过特殊处理以后, 电路导线在金属板两面相互连通, 而与金属板本身高度绝缘。金属芯印制板的优点是散热性能好, 尺寸稳定; 所用金属材料具有电磁屏蔽作用, 可以防止信号之间相互干扰; 并且制造成本也比较低。金属芯印制板的制造方法有很多种, 典型的工艺流程如图 13-2 所示。

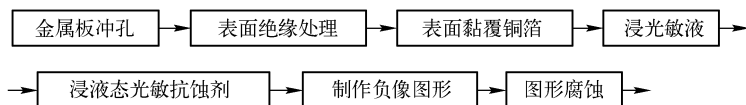


图 13-2 金属芯印制板的制造工艺流程

### 13.1.1.2 印制电路板的分类

#### 1. 刚性印制电路板

##### (1) 单面印制电路板

单面印制板是在厚度为  $0.2\sim 5\text{mm}$  的绝缘基板上, 一个表面敷有铜箔, 通过印制和腐蚀的方法, 在基板上形成印制电路。单面板制造简单, 装配方便, 适用于一般电路要求, 如收音机、电视机等。不适用于要求高组装密度或复杂电路的场合。

##### (2) 双面印制电路板

在绝缘基板上 (其厚度为  $0.2\sim 5\text{mm}$ ) 两面均敷有铜箔, 可在基板的两面制成印制电路。它适用于一般要求的电子设备, 如电子计算机、电子仪器、仪表等。由于双面印制电路的布线密度较高, 所以能减小设备的体积。

##### (3) 多层印制电路板

在绝缘基板上制成三层以上印制电路的印制板称为多层印制电路板。它是在垂直叠层上使用了一系列的层压、走线和预浸处理的多层结构, 其厚度一般为  $1.2\sim 2.5\text{mm}$ 。除了钻孔、孔金属化、制板、图形镀铜、铜锡合金等基本采用双面板工艺外, 还有它独特的加工工艺, 如层与层之间定位、叠压等。它是先将各内层板制出图形并蚀成导电图形, 进行清洁处理和氧化处理后, 用事先钻好的孔定位。为了把夹在绝缘基板中间的电路引出, 多层印制板上安装元件的孔需要金属化, 即在小孔内表面涂覆金属层, 使之与夹在绝缘基板中间的印制电路接通。

#### ① 优点。

- 使用多层板能加强电源线和地线的去耦。
- 与集成电路块配合使用, 可以减小产品的体积与重量。
- 有可能增设屏蔽层, 以提高电路的电气性能。
- 所有各层可同时制作, 且通过对穿通孔金属化能同时实现层间连接; 由于层数多, 从而能采用屏蔽层、信号层和电源电路层进行安装。

#### ② 缺点。

- 由于必须将金属淀积到导线和介质端面上, 确保可靠的层间连接的问题颇为复杂。
- 控制厚度均匀性的过程复杂, 导线金属和基底介质的膨胀系数不同, 故对热作用和机械作用很灵敏。

- 腐蚀时有脏介质的危险, 要求层间配合及制造底板的精度高, 故工艺过程复杂。

## 2. 软性 PCB

用软性绝缘基材制成的 PCB 称为软性 PCB 或挠性 PCB。它适应了当今电子产品向高密度及高可靠性、小型化、轻量化方向发展的需要。

### (1) 单面软性 PCB

单面软性 PCB 所用的绝缘基底材料有聚酯、聚酰亚胺、聚四氟乙烯、软性环氧-玻璃布等。单面软性 PCB 又可进一步分为如下四类:

① 无覆盖层单面连接。这类软性 PCB 的导线图形在绝缘基材上, 导线表面无覆盖层。像通常的单面刚性 PCB 一样, 这类产品是最廉价的一种, 通常用在非要害且有环境保护的应用场合。其互连是用锡焊、熔焊或压焊来实现的。它常用在早期的电话机中。

② 有覆盖层单面连接。只是在导线表面多了一层覆盖层, 覆盖时需把焊盘露出来。它是单面软性 PCB 中应用最多、最广的一种, 在汽车仪表、电子仪器中广泛使用。

③ 无覆盖层双面连接。此类的连接盘接口在导线的正面和背面均可连接。为了做到这一点, 在焊盘处的绝缘基材上开一个通路孔, 该通路孔可在绝缘基材的所需位置上先通过采用冲制、蚀刻或其他机械方法制成。它用于需要两面安装元、器件和需要锡焊的场合, 通路处焊盘区无绝缘基材, 此类焊盘区通常用化学方法去处理。

④ 有覆盖层双面连接。这类 PCB 与前类的不同之处是表面有一层覆盖层。但覆盖层有通路孔, 也允许其两面都能端接, 且仍保持覆盖层。这类软性 PCB 是由两层绝缘材料和一层金属导体制成的, 被用在需要覆盖层与周围装置相互绝缘, 且自身又要相互绝缘, 末端又需要正、反面都连接的场合。

### (2) 双面软性 PCB

双面软性 PCB, 有两层导体。这类双面软性 PCB 的应用和优点与单面软性 PCB 相同, 其主要优点是增加了单位面积的布线密度。按有、无金属化孔和有、无覆盖层它可分为: 无金属化孔、无覆盖层的; 无金属化孔、有覆盖层的; 有金属化孔、无覆盖层的; 有金属化孔、有覆盖层的 4 种。其中, 无覆盖层的双面软性 PCB 较少应用。

### (3) 多层软性 PCB

采用多层层压技术, 可制成多层软性 PCB。最简单的多层软性 PCB 是在单面 PCB 的两面覆有两层铜屏蔽层而形成的三层软性 PCB。这种三层软性 PCB 在电特性上相当于同轴导线或屏蔽导线。最常用的多层软性 PCB 结构是四层结构, 用金属化孔实现层间互连, 中间两层一般是电源层和接地层。

多层软性 PCB 的优点是基材薄膜重量轻并有优良的电气特性, 如低的介电常数。用聚酰亚胺薄膜为基材制成的多层软性 PCB 板, 比刚性环氧玻璃布多层 PCB 板的重量约轻 1/3, 但它失去了单面、双面软性 PCB 优良的可挠性, 大多数此类产品是不要求可挠性的。

多层软性 PCB 可进一步分成如下类型:

① 挠性绝缘基材上构成多层 PCB, 其成品规定为可以挠曲。这种结构通常是把许多单面或双面微带可挠性 PCB 的两面端黏结在一起, 但其中心部分并未黏结在一起, 从而具有高度可挠性。为了具有所希望的电气特性, 如特性阻抗性能和它所互连的刚性 PCB 相匹配, 多层软性 PCB 部件的每个线路层, 必须在接地面上设计信号线。为了具有高度的可挠性, 导线层上可用一层薄的、适合的涂层, 如聚酰亚胺, 代替一层较厚的层压覆盖层。金属化孔使可挠性线路层之间实现所需的互连。这种多层软性 PCB 最适合用于要求可挠性、高可靠性和高密

度的设备中。

② 在软性绝缘基材上构成多层 PCB，其成品未规定可以挠曲。这类多层软性 PCB 是用软性绝缘材料，如聚酰亚胺薄膜经层压制成多层板，在层压后失去了固有的可挠性。当设计要求最大限度地利用薄膜的绝缘特性，如低的介电常数、厚度均匀的介质、较轻的重量和能连续加工等特性时，就采用这类软性 PCB。

③ 在软性绝缘基材上构成多层 PCB，其成品必须可以成形，而不是可连续挠曲。虽然它用软性材料制造，但因受电气设计的限制，如为了降低导体电阻，要求用厚的导体，或为了所需的阻抗或电容，要求在信号层和接地层之间有厚的绝缘隔离。因此，在成品应用时它已成型，并在应用中不能再挠曲。一般在航空电子设备单元内部布线中应用。

#### (4) 优点

① 可挠性。应用软性 PCB 的一个显著优点是它能更方便地在三维空间走线和装连，也可卷曲或折叠起来使用。只要在允许的曲率半径范围内卷曲，可经受几千次至几次使用而不至损坏。

② 减小体积。在组件装连中，同使用导线电缆相比，软性 PCB 的导体截面薄而扁平，减少了导线尺寸，并可沿着机壳成形，使设备的结构更加紧凑、合理，减小了装连体积；与刚性 PCB 相比，空间可节省 60%~90%。

③ 减轻重量。在同样体积内，软性 PCB 与导线电缆比，在相同载流量下，其重量可减轻约 70%；与刚性 PCB 相比，重量减轻约 90%。

④ 装连的一致性。用软性 PCB 装连，消除了用导线电缆接线时的差错。只要加工图纸经过校对通过后，所有以后生产出来的绕性电路都是相同，装连接线时不会发生错接。

⑤ 增加了可靠性。当采用软性 PCB 装连时，由于可在 X、Y、Z 三个平面上布线，减少了转接互连，使整个系统的可靠性增加，且对故障的检查提供了方便。

⑥ 电气参数设计的可控性。根据使用要求，设计师在进行软性 PCB 设计时，可控制电容、电感、特性阻抗、延迟和衰减等参数，能设计成具有传输线的特性。因为这些参数与导线宽度、厚度、间距、绝缘层厚度、介电常数、损耗角正切等有关，这在采用导线电缆时是难以办到的。

⑦ 末端可整体锡焊。软性 PCB 像刚性 PCB 一样，具有终端焊盘，可消除导线的剥头和搪锡，从而节约了成本。终端焊盘与元器件、插头连接，可用浸焊或波峰焊来代替每根导线的手工锡焊。

⑧ 材料使用可选择。软性 PCB 可根据不同的使用要求，选用不同的基底材料来制造。例如，在要求低成本的装连应用中，可使用聚酯薄膜；要求具有优良性能的装连应用中，可使用聚酰亚胺薄膜。

⑨ 低成本。用软性 PCB 装连，能使总的成本降低。这是因为软性 PCB 的导线，其各种参数的一致性和实行整体端接，消除了电缆导线装连时经常发生的错误和返工，且软性 PCB 的更换比较方便。软性 PCB 的应用使结构设计简化，它可直接黏附到构件上，减少线夹和其固定件。对于需要有屏蔽的导线，用软性 PCB 价格较低。

⑩ 加工的连续性。由于软性覆箔板可连续成卷状供应，因此可实现软性 PCB 的连续生产。这也有利于降低成本。

#### (5) 缺点

① 初期一次性投入成本高。由于软性 PCB 是为特殊应用而设计、制造的，所以开始的电路设计、布线和照相底版所需的费用较高。除非有特殊需要应用软性 PCB 外，通常少量应用时，最好不采用。

② 软性 PCB 的更改和修补比较困难。软性 PCB 一旦制成后，要更改必须从底图或编制的光

绘程序开始, 因此不易更改。其表面覆盖一层保护膜, 修补前要去掉, 修补后又要复原, 这是比较困难的工作。

③ 尺寸受限制。软性 PCB 通常用间歇法工艺制造, 受到生产设备尺寸的限制, 不能做得很长、很宽。

④ 操作不当易损坏。装连人员操作不当易引起软性电路的损坏, 其锡焊和返工都需要经过训练的人员操作。

### 3. 刚性-软性多层 PCB

刚性-软性多层 PCB 通常是在一块或两块刚性 PCB 上, 包含有构成整体所必不可少的软性 PCB。软性 PCB 层被层压在刚性多层 PCB 内, 这是为了具有特殊电气要求或为了要延伸到刚性电路外面。这类产品在那些把压缩重量和体积作为关键, 且要保证高可靠性、高密度组装和优良电气特性的电子设备中得到了广泛的应用。图 13-3 是五层刚-挠性印制电路板的结构示意图。

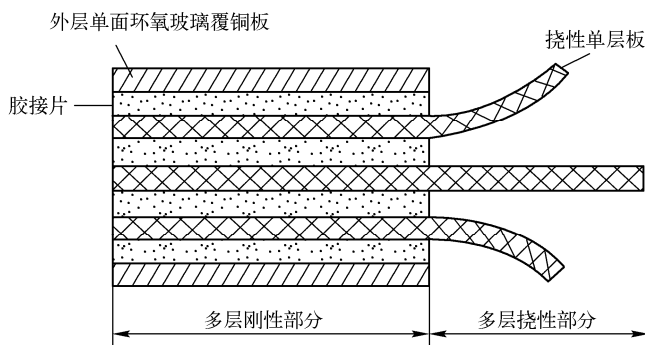


图 13-3 五层刚-挠性印制电路板的结构示意图

每单层挠性板均可单独自由挠曲、多层刚性部分有金属化孔。金属化孔把各层(包括挠性层)电气互连起来。刚性-软性多层 PCB 也可把许多单面或双面软性 PCB 的末端黏合压制在一起成为刚性部分, 而中间不黏合成为软性部分。这类 PCB 越来越多地用在那些要求超高封装密度、优良电气特性、高可靠性和严格限制体积的场合。

### 4. 平面印制电路板

印制电路板的印制导线嵌入绝缘基板, 与基板表面平齐, 一般情况下在印制导线上都具有耐磨金属电镀层。这种印制电路板通常用于转换开关、电子计算机的键盘等。

#### 13.1.1.3 印制电路板上的干扰

PCB 上的布线是有阻抗、电容和电感特性的。布线的阻抗一般由铜的横切面面积决定; 当频率超过数千赫兹时, 导线的阻抗主要由导线的电感决定。布线的电容主要由走线间距决定。细而长的回路导线呈现高电感。对于 1 盎司铜线来说, 在 0.25mm 厚的 FR4 碾压板上, 位于地线层上方的 0.5mm 宽、20mm 长的线能产生 9.8mΩ 的阻抗, 20nH 的电感以及与地之间 1.66pF 的耦合电容。

印制电路板的过孔大约引起 0.5pF 的电容。一个集成电路本身的封装材料引入 2~6pF 电容。一个电路板上的接插件, 有 520nH 的分布电感。一个双列直插的 24 引脚集成电路插座, 引入 4~18nH 的分布电感。这些小的分布参数对于运行在较低频率下的微控制器系统是可以忽略不计的, 而对于高速系统必须予以特别注意。在高频情况下, 印制电路板上的走线、过孔、电阻、电容、接插件的分布电感与电容等不可忽略。电容的分布电感不可忽略, 电感的分布电容也不可忽略。电阻会产生对高频信号的反射和吸收, 走线的分布电容也会起作用。

印制电路板上的电磁干扰源包括微处理器、微控制器、静电放电、传送器、瞬时功率执行元件，如机电式继电器、开关电源、闪电等。在一个微控制器系统里，时钟电路通常是最大的宽带噪声发生器，而这个噪声几乎占据了整个频谱。随着大量高速半导体器件的应用，其边沿跳变速率非常快，这种电路可以产生高达 300MHz 的谐波干扰。

所有的电子电路都可以接收传送的电磁干扰。辐射耦合在高频中十分常见，而传导耦合路径在低频中更为常见。在数字电路中，临界信号最容易受到电子干扰的影响。这些信号包括复位、中断和控制信号。模拟的低级放大器、控制电路和电源调整电路也容易受到噪声的影响。

为了进行电磁兼容性设计并符合电磁兼容性标准，设计者需要将辐射（从产品中泄露的射频能量）减到最小，增强电子设备对辐射（进入产品中的射频能量）的抗干扰能力。

#### （1）PCB 中带状线、电线、电缆间的串音

印制电路板带状线、电线、电缆间的串音是 PCB 线路中存在的最难克服的问题之一。如果一个高幅度的瞬变电流或快速上升的电压出现在靠近载有信号的导体附近，电磁干扰问题主要就是串音。当一条长电缆载有几组串行或并行高速数据线和遥控线时，串音干扰也成为主要问题。彼此靠近的电线和电缆之间的串音可由电场通过互容、磁场通过互感引起。一般来说，在高频时电容耦合是主要的，但是，如果源和接收器之一或两者都采用屏蔽电缆并在屏蔽的两端接地，则磁场耦合将是主要的。另外，低频一般有较低的电路阻抗，电感耦合是主要的。

串音预测计算程序是计算机辅助 PCB 设计软件中的重要内容。通过串音预测，可以确定几层 PCB 布置的串音电压和脉冲上升时间表，从而保证 PCB 上数字和模拟信号保持适当的间距。当导体之间或信号导体与返回导体（如地平面）之间距离较大时，采用电流元或电流环的发射和接收特性进行耦合预测更为精确。例如，PCB 上带状线端接高阻抗并远离地平面时，用电流元模拟电场和磁场的发射特性更方便。当带状线形成环路时，无论是圆形还是矩形，均可用环的接收和发射特性模拟。当两环在同一块 PCB 表面上时，则为共面耦合。当一环在一块 PCB 上面时，则为共轴耦合。

#### （2）数字 PCB 的电磁辐射干扰

计算机等电子设备的电路一般都是由数字 PCB 实现的。在很多情况下，数字 PCB 产生的辐射问题要比模拟 PCB 更为严重。由于数字电路的驱动电流较大，致使辐射的强度也较大；而数字化的信息信号一般都是非周期信号，其辐射频谱将是窄带与宽带两种辐射的叠加，频率可从几兆赫到数百兆赫，如此宽的辐射频率范围，不可避免地会引起一系列 EMI 和 TEMPEST 问题。

PCB 的电磁辐射分为差模辐射和共模辐射。差模辐射的特点取决于闭合回路中电流的特性；共模辐射则由对地的干扰电压引起。

影响 PCB 电磁辐射的因素主要是 PCB 的结构和激励因素。PCB 的结构不同，其辐射效果也不相同，传输带的长度、回路面积、地线走向、整体布局等都会影响到辐射的效果。除结构因素外，激励因素，如幅值、周期、脉冲宽度、上升与下降时间、频率等，也都是影响辐射效果及频率特征的重要因素。

当走线长度大于噪声频率相应波长的  $1/20$  时，就产生天线效应，噪声通过走线向外发射。当系统工作在 50MHz 时，将产生传输线效应和信号的完整性问题；而当系统时钟达到 120MHz 时，只有通过高速电路设计技术，才能实现设计过程的可控性。

#### 13.1.1.4 表面贴装技术对印制板的要求

表面贴装技术已经逐渐成为组装电子设备的主流技术，它比传统的插装技术有更多优点，同

时也对印制电路板提出了新的要求。

(1) 采用表面贴装技术后,提高了安装密度,印制板面积小,布线密度提高。

(2) 印制电路板必须平整,尽可能减小翘曲、扭曲度,尺寸稳定性要高。

(3) 印制板上用于贴装的定位孔尺寸精度要求高。

(4) 目前大多采用表面贴装和插装结合的混合装配,这不仅要求印制电路板高精度、高密度,而且还要求印制板小孔径。

(5) 与厚膜电路混合。过去一般用焊接的方法把厚膜电路固定在印制板上。现在采用把电阻材料顺序地黏合到绝缘板上,再选择性地腐蚀除去不需要的部分,形成所要的图形;用电镀加厚的办法以减小电阻,用腐蚀方法以增加电阻。

### 13.1.1.5 印制电路的设计要点

#### 1. 电路图上的信息

为了使布线从一开始就有一个明确的目标,在电路图上应给出尽量多的信息,包括:

(1) 不同功能模块在电路板上的位置要求。

(2) 敏感器件和 I/O 接口的位置要求。

(3) 线路图上应标明不同的地线,以及对关键连线的要求。

(4) 标明在哪些地方不同的地线可以连接起来,哪些地方不允许。

(5) 哪些信号线必须靠近地线。

#### 2. PCB 设计中的电路措施

为达到防干扰的目的,实际 PCB 设计中可采用以下电路措施:

(1) 在 PCB 走线上串接一个电阻,降低控制信号线上下沿跳变速率。

(2) 为继电器等提供某种形式的阻尼(高频电容、反向二极管等)。

(3) 对进入印制板的信号要加滤波,从高噪声区到低噪声区的信号也要加滤波,同时用串接终端电阻的办法,减小信号反射。在低阻抗的电源和高阻抗的数字电路之间,需要 LC 滤波器,以保证电源电路的阻抗匹配,如图 13-4 所示。

(4) 集成电路上该接电源、接地的端子都要接触良好,不要悬空。

(5) 闲置不用的门电路输入端不要悬空,而是通过相应的匹配电阻接电源或接地。闲置不用的运放同相输入端接地,反相输入端接前级的输出端。

(6) 每个电解电容边上都要加一个小的低频旁路电容。

(7) 用大容量的钽电容或聚酯电容而不用电解电容作电路板上的充放电储能电容。使用管状电容时,外壳要接地。

(8) 对输入和按键采用电平检测而非边沿检测。

(9) 使用前沿速率尽可能慢且平滑的数字信号(不超过失真极限)。

(10) CMOS 的输入阻抗很高,且易受感应,因而在使用时对闲置端要通过电阻接地或接正电源。

(11) 在印制电路板中有接触器、继电器、按钮等元件时,若操作它们均会产生较大的火花放电;必须采用 RC 吸收电路来吸收放电电流,一般,  $R$  取  $1 \sim 2k\Omega$ ,  $C$  取  $2.2 \sim 4.7\mu F$ 。

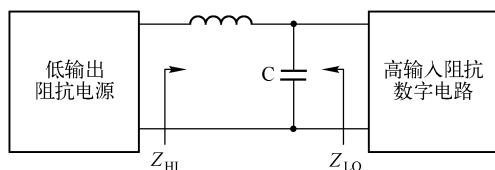


图 13-4 LC 滤波器

### 13.1.1.6 印制电路板设计步骤

随着我国电子工业的发展,各种类型印制电路板的需求量越来越大,要求设计制造印制电路的周期越短越好。电路印制板的 CAD 方法精简了工艺标准检查,且修改可在同一图纸上反复进行,从而大大缩短了设计周期,也缩短了制造环节,提高了劳动生产率。

#### 1. 印制板材料的选择

印制板的材料选择必须考虑其电气和机械特性,当然还要考虑购买的相对价格和制造的相对成本。电气特性是指基材的绝缘电阻、抗电弧性、印制导线电阻、击穿强度、介电常数及电容等。机械特性是指基材的吸水性、热膨胀系数、耐热性、抗挠强度、抗冲击强度、抗剪强度和硬度。

#### 2. 印制板厚度的确定

从结构的角度考虑印制板的厚度,主要是考虑板对其上装有的所有元器件重量的承受能力和使用中承受的机械负荷能力。如果只装配集成电路、小功率晶体管、电阻、电容等小功率元器件,在没有较强的负荷振动条件下,使用厚度为 1.5mm (或 1.6mm)、尺寸在 500mm×500mm 之内的印制板。如果板面较大或无法支撑时,应选择 2~2.5mm 厚的板。

印制板板厚已标准化,其尺寸为 1.0mm、1.5mm、2.0mm、2.5mm 几种,常用的是 1.5mm 和 2.0mm。对于尺寸很小的印制板(如计算器、电子表和便携式仪表中用的印制板)为了减小重量、降低成本,可选用更薄一些的来制造。

#### 3. 确定印制板的外形及结构

印制板的结构尺寸与印制板的制造、装配有密切关系。应从装联工艺角度考虑两个方面的问题:一方面是便于自动化组装,使设备的性能得到充分利用,能使用通用化、标准化的工具和夹具。另一方面是便于将印制板组装成不同规格的产品,安装方便,固定可靠。

印制板对外连接一般包括电源线、地线、板外元器件的引线,板与板之间的连接线等,绘图时应大致确定其位置和排列顺序。若采用接插件引出时,要确定接插件位置和方向。图 13-5 是温度控制器电路板的对外连接图。

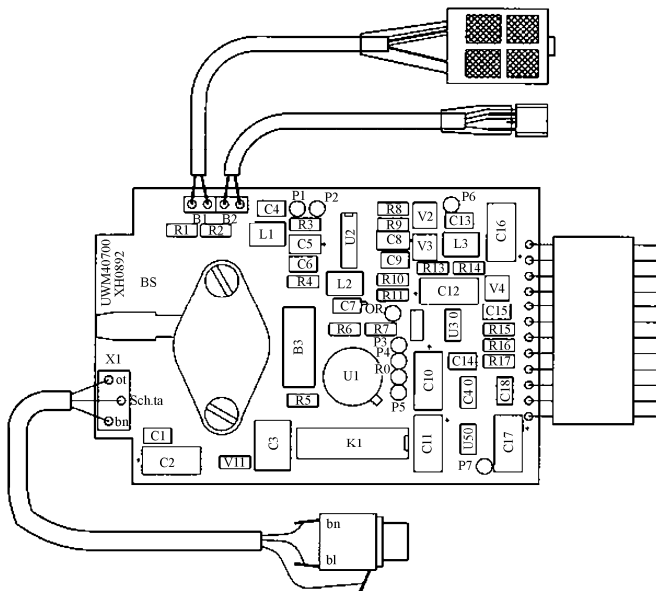


图 13-5 温度控制器电路板的对外连接图



**印制板外形尺寸的确定** 根据产品的结构要求,考虑对原材料的有效利用,应选取合适的尺寸,不宜选用过大也不应选用过小。选材过大,元件排列稀疏,浪费材料;选材过小,元件密集度高,元件引线,外壳又易相碰,给安装、调试和维修带来不方便。

印制板外形尺寸受各种因素制约,在设计时注意考虑以下因素:

(1) 形状 优先考虑矩形。

(2) 安装、定位 考虑印制板的安装、固定孔位,安装某些特殊元器件或插接定位用的孔、槽等几何形状的位置和尺寸,印制板与机壳或其他结构件连接的螺孔位置及孔径应明确标出。图 13-6 是计算机上一种插卡外形尺寸草图。

(3) 类型 建议优先采用双面印制板布线。若电路比较简单可采用单面板,若电路非常复杂可采多层印制板布线。

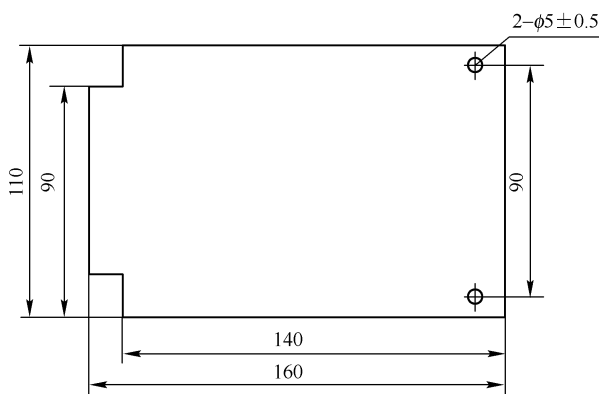


图 13-6 插卡外形尺寸草图

#### 4. 元器件的布局

元器件的布局,就是将电路元器件安放在印制板布线区内。布局是否合理不仅影响后面的布线工作,而且对整个电路板的性能也有重要作用。

(1) 元器件的排列 元器件在印制板上进行排列时,要尽可能按元器件的轴线方向排列,元器件以卧式安装为主,并与板的四边垂直或平行,这样排列元件版面美观、整齐、规范,对安装调试及维修均较方便。

(2) 元器件安装尺寸 设计 PCB 时,元器件的间距通常采用 0.1 英寸即 2.54mm 为一个间距单位,设计 PCB 时尽可能采用这个单位,这样做既有利于安装规范,又便于 PCB 加工和检测。

#### 5. 布线设计

布线,就是按照电原理图的线路连接要求和元器件的布局,为了将元器件连接起来而在 PCB 上印制导线。这是印制板设计中的关键步骤。

### 13.1.2 印制电路板上的元器件

#### 13.1.2.1 元器件的选择

有两种基本的电子元件,即有引脚的和无引脚的元件。有引脚线元件有寄生效应,尤其在高频时,该引脚形成了一个小电感,大约是 1nH/mm/引脚。引脚的末端也能产生一个小电容性的效应,大约有 4pF。因此,引脚的长度应尽可能短。

与有引脚的元件相比,无引脚且表面贴装的元件,其寄生效应要小一些。从电磁兼容性的观点看,表面贴装元件效果最好,其次是放射状引脚的元件,最后是轴向平行引脚的元件。

##### 1. 电阻

由于表面贴装元件具有低寄生参数的特点,因此,表面贴装电阻总是优于有引脚的电阻。对于有引脚的电阻,应首选碳膜电阻,其次是金属膜电阻,最后是线绕电阻。由于在相对低的工作频率下(约 MHz 数量级),金属膜电阻是主要的寄生元件,因此,它适用于高功率密度和高准确度的电路中。线绕电阻有很强的电感特性,对频率敏感;它最适合用在大功率电路中。

在放大器的设计中,电阻的选择非常重要。在高频环境下,电阻的阻抗会因为电阻的电感效应而增加。因此,增益控制电阻的位置应该尽可能靠近放大器电路以减少电路板的电感。在有上拉/下拉电阻的电路中,晶体管或集成电路的快速切换会增加上升时间。为了减小这个影响,所有的偏置电阻必须尽可能靠近有源器件,从而减少 PCB 连线的电感。

在稳压(整流)或参考电路中,直流偏置电阻应尽可能靠近有源器件以改善瞬态响应时间。在 RC 滤波网络中,线绕电阻的寄生电感很容易引起本机振荡,所以必须考虑由电阻引起的电感效应。

## 2. 电容

由于电容种类繁多,性能各异,选择合适的电容并不容易。但是电容的使用可以解决许多 EMC 问题。铝质电解电容可在单位体积内得到较大的电容值,但也使得内部感抗增加。陶质电容的结构是在陶瓷绝缘体中包含多个平行的金属片,其主要寄生为片结构的感抗,通常这将在低于 1MHz 的区域造成阻抗。

铝电解电容适用于低频终端,主要是存储器和低频滤波器领域。在中频范围内(从 kHz 到 MHz),陶质电容比较适合,常用于去耦电路和高频滤波。特殊的低损耗(通常价格比较昂贵)陶质电容和云母电容适合于甚高频应用和微波电路。

### (1) 旁路电容

旁路电容的主要功能是产生一个交流分路,从而消去进入易感区的那些不需要的能量。旁路电容一般作为高频旁路器件用来减小对电源模块的瞬态电流需求。通常铝电解电容比较适合作旁路电容,其电容值取决于 PCB 上的瞬态电流需求。若 PCB 上有许多集成电路、高速开关电路和具有长引线的电源,则应选择大容量的电容。

### (2) 去耦电容

在直流电源回路中,负载的变化会引起电源噪声。例如,在数字电路中,当电路从一个状态转换为另一种状态时,就会在电源线上产生一个很大的尖峰电流,形成瞬变的噪声电压。局部去耦能够减少沿着电源干线的噪声传播。连接着电源输入口与 PCB 之间的大容量旁路电容起着一个低频干扰滤波器的作用,同时,作为一个电能储存器以满足突发的功率需求。此外,在每个 IC 的电源和地之间都应当有去耦电容,这些去耦电容应该尽可能接近 IC 引脚,这将有助于滤除 IC 的开关噪声。

配置去耦电容可以抑制因负载变化而产生的噪声,是印制电路板可靠性设计的一种常规做法。配置原则如下:

① 电源输入端跨接 13~130 $\mu$ F 的电解电容器。若有可能,接 130 $\mu$ F 以上的更好。

② 原则上每个集成电路芯片都应布置一个 0.01 $\mu$ F 的瓷片电容,如遇印制板空隙不够,可每 4~8 个芯片布置一个 1~13 $\mu$ F 的钽电容。这种器件的高频阻抗特别小,在 500kHz~20MHz 范围内阻抗小于 1 $\Omega$ ,而且漏电流很小(0.5 $\mu$ A 以下)。最好不用电解电容,电解电容在高频时表现为电感。

③ 对于抗噪能力弱、关断时电源变化大的器件,如 RAM、ROM 存储器件,应在芯片的电源线和地线之间直接接入高频退耦电容。

④ 电容引线不能太长,尤其是高频旁路电容不能有引线。

去耦电容值的选取并不严格,可按  $C=1/f$  计算,即 13MHz 取 0.1 $\mu$ F。对微控制器构成的系统,去耦电容取 0.1~0.01 $\mu$ F 之间都可以。好的高频去耦电容可以去除高到 1GHz 的高频成分。陶瓷片电容或多层陶瓷电容的高频特性较好。

选择去耦电容时,除了考虑电容值外,ESR(Equivalent Series Resistance,等效串联电阻)值

也会影响去耦能力。为得到最好的 EMC 特性, 应该选择 ESR 值低于  $1\Omega$  的电容。

### 3. 电感

电感是一种可以将磁场和电场联系起来的元件, 其固有的、可以与磁场互相作用的能力使其潜在地比其他元件更为敏感。电感比起电容和电阻而言的一个优点是它没有寄生感抗, 因而其表面贴装类型和引线类型没有什么差别。

开环电感的磁场穿过空气, 这将引起辐射并带来电磁干扰问题。对闭环电感来说, 磁场被完全控制在磁芯中, 因此在电路设计中这种类型的电感更理想, 当然它们也比较昂贵。螺旋环状的闭环电感的一个优点是: 它不仅将磁环控制在磁芯中, 还可以自行消除所有外来的附带场辐射。在 DC-DC 变换中, 电感必须能够承受高饱和电流, 并且辐射小, 线轴式电感具有满足该应用要求的特性。

电感的磁芯材料主要有两种类型: 铁和铁氧体。铁磁芯电感用于低频场合 (几十千赫), 而铁氧体磁芯电感用于高频场合。因此铁氧体磁芯电感更适合于 EMC 应用。

在 EMC 的特殊应用中, 有两类特殊的电感: 铁氧体磁珠和铁氧体夹。铁氧体磁珠是单环电感, 通常单股导线穿过铁氧体型材而形成单环。这种器件在高频范围的衰减为 10dB, 而直流的衰减量很小。类似铁氧体磁珠, 铁氧体夹在高达 MHz 的频率范围内的共模 (CM) 和差模 (DM) 的衰减均可达到 10~20dB。

### 4. 二极管

二极管是抑制尖峰电压噪声源的最有效的器件之一。如图 13-7 所示, 控制终端开/关线圈, 线圈中的开关尖峰脉冲将耦合并辐射到电路的其他部分。二极管  $VD_1$  能嵌位电压的波动。

图 13-8 是典型的变压和整流电路。 $VD_2$  是肖特基或齐纳二极管, 用于抑制滤波后的尖峰瞬态噪声电压。

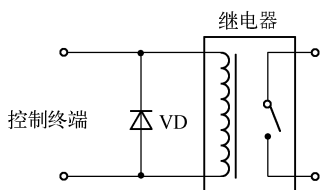


图 13-7 继电器瞬时尖峰抑制

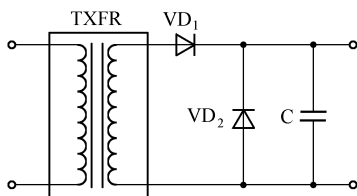


图 13-8 DC 变压器尖峰抑制

在汽车控制应用中, 无论有刷还是无刷电动机, 当电动机运行时, 都将产生电刷噪声或换向噪声。因此, 需要噪声抑制二极管, 为了改进噪声抑制效果, 二极管应尽量靠近电动机接点。

### 5. 集成电路

现在集成电路有多种封装结构, 对于分离元件, 引脚越短, EMI 问题越小。因为表面贴装器件有更小的安装面积和更低的位置, 因而有更好的 EMC 性能, 所以, 应首选表面贴装器件。甚至直接在 PCB 板上安装裸片。

集成电路的大部分噪声都与时钟频率及其多次谐波有关。因此无论电路设计还是 PCB 设计都应该考虑时钟电路, 以减低其噪声。合理的地线、适当的去耦电容和旁路电容能减小辐射。用于时钟分配的高阻抗缓冲器也有助于减小时钟信号的反射和振荡。

对于使用 TTL 和 CMOS 器件的混合逻辑电路, 由于其不同的开关/保持时间, 会产生时钟、有用信号和电源的谐波。为避免这些潜在的问题, 最好使用同系列的逻辑器件。由于 CMOS 器件的门限宽, 现在大多数设计者都选用 CMOS 器件。现代数字集成电路主要使用 CMOS 工艺制造, CMOS 器件的静态功耗很低。但是在高速开关的情况下, CMOS 器件需要电源提供瞬时功率, 高速 CMOS

器件的动态功率要求超过同类双极性器件。因此，必须对这些器件加去耦电容以满足瞬时功率要求。

### 13.1.2.2 元器件的布局

在印制板设计中，布局是一个重要的环节。布局结果的好坏将直接影响布线的效果。布局的方式分两种：一种是交互式布局；另一种是自动布局；一般是在自动布局的基础上用交互式布局进行调整。例如，在布局时可根据走线的情况对门电路进行再分配，将两个门电路进行交换，使其成为便于布线的最佳布局。在布局完成后，还可对设计文件及有关信息进行返回标注于原理图，使得 PCB 中的有关信息与原理图相一致，同时对模拟的有关信息进行更新，使得能对电路的电气性能及功能进行板级验证。

#### 1. 布局原则

目前，电子设备向多功能、小型化方向发展，这就要求在布局时，必须精心设计，巧妙安排，在各方面要求兼容的条件下，力求提高组装密度，以缩小整机尺寸。排列元器件时应考虑下列因素。

##### (1) 应保证电路性能指标的实现

电路性能，一般是指电路的频率特性、波形参数、电路增益和工作稳定性等有关指标，具体指标随电路的不同而异。例如，对于高频电路，在元器件布局时，解决的主要问题是减小分布参数的影响。布局不当，将会使分布电容、接线电感、接地电阻等分布参数增大，会直接改变高频电路的参数，从而影响电路基本指标的实现。

元器件的布局应使电磁场的影响减小到最低限度，采取措施避免电路之间形成干扰以及防止外来的干扰，以保证电路正常稳定地工作。电子设备中数字电路、模拟电路以及电源电路产生的干扰以及抑制干扰的方法不相同，此外高频、低频电路由于频率不同，其干扰以及抑制干扰的方法也不相同。所以在元件布局时，应该将数字电路、模拟电路以及电源电路分别放置，将高频电路与低频电路分开。有条件的应使之各自隔离或单独做成一块电路板。此外，布局中还应特别注意强、弱信号的器件分布及信号传输方向途径等问题。时钟发生器、晶振和 CPU 的时钟输入端都易产生噪声，要相互靠近些。易产生噪声的器件、小电流电路、大电流电路等应尽量远离逻辑电路。如有可能，应另做电路板，这一点十分重要。

此外，不论什么电路，使用的元器件，特别是半导体器件，对温度非常敏感，元器件布局应采取有利机内的散热和防热的措施，以保证电路性能指标不受温度的影响。

##### (2) 应有利于布线，方便于布线

元器件布设的位置，直接决定着连线长度和敷设路径，布线长度和走线方向不合理，会增加分布参数和产生寄生耦合，而且不合理的走线还会给装接工艺带来麻烦。

##### (3) 应满足结构工艺的要求

电子设备的组装不论是整机还是分机，都要求结构紧凑、外观性好、重量平衡、防振、耐振等。因此，元器件布局时要考虑重量大的元器件及部件的位置应分布合理，使整机重心降低，机内重量分布均衡。对那些耐冲击和耐振动力差，或工作性能受冲击、振动影响较大的元器件及部件，在布局时应充分考虑并分别采取措施。

##### (4) 应有利于设备的装配、调试和维修

现代电子设备由于功能齐全、结构复杂，往往将整机分为若干功能单元（分机），每个单元在安装、调试方面都是独立的。因此元器件的布局要有利于生产时装调的方便和使用维修时的方便，如便于调整、便于更换元器件等。

##### (5) 美观原则

产品的成功,一是要注重内在质量,二是兼顾整体的美观。在保证电路功能和性能指标的前提下,PCB 上元器件的布局应考虑排列的美观性。元器件的布局要求均衡,疏密有序,不能头重脚轻或一头沉。

#### (6) 排列顺序

先大后小,先放置面积较大的元器件;先集成后分立,放置集成电路后,再在其周围放置其他分立器件;先主后次,先放置主电路元器件,之后再放置次电路元器件;每个单元电路,应以核心器件为中心,再围绕它放置其他附属器件。

#### (7) 就近原则

当印制板上对外连接确定后,相关电路部分应就近安放,避免走远路,绕弯子,尤其忌讳交叉穿插。

### 2. 布局的一般方法

元器件在印制板平面上的排列,可分为三种方式,即不规则排列、坐标排列和坐标格排列。不规则排列主要从电性能考虑,其优点是减少印制导线和元器件的接线长度,从而减少电路的分布参数。缺点是外观不整齐,也不便于机械化装配。这种排列一般适用于高频(30MHz 以上),如图 13-9(a)所示。

坐标排列是指元器件与印制电路板的一边平行或垂直。其优点是排列整齐,缺点是引线可能较长。适用于低频(1MHz 以下),如图 13-9(b)所示。

坐标格排列是指元器件除与印制电路板的一边平行或垂直以外,同时要求孔位于坐标格的交点上。对于孔组至少应有一个孔在坐标网格交点上,如图 13-9(c)所示。这种排列方法除具有坐标排列的优点外,更便于机械化打孔及装配。坐标网格一般有 2.54mm 及 2.50mm 两种。

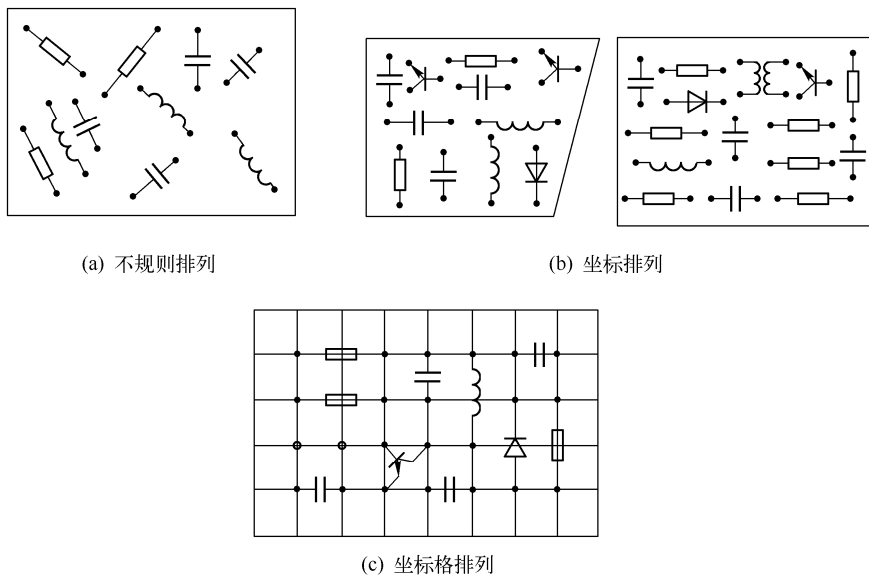


图 13-9 元器件在印制板平面上的排列

#### (1) 按电路组成顺序成直线排列的方法

这种方法一般按电原理图组成的顺序(即根据主要信号的放大、变换的传递顺序)按级成直线布置各个功能电路单元的位置,使布局便于信号流通,并使信号尽可能保持一致的方向。晶体管电路及以集成电路为中心的电路都是如此。各级电路以器件为中心,元件就近排列,各级间应

留适当的距离, 并根据元件尺寸进行合理布设, 使前面一级的输出与后面一级的输入很好衔接, 尽量使小型元件直接跨接在电路之间。这种排列的优点如下:

- ① 电路结构清楚, 便于布设、检查, 也便于各级电路的屏蔽或隔离。
- ② 输出级与输入级相距甚远, 使级间寄生反馈减小。
- ③ 前后级之间衔接较好, 可使连接线最短, 减小电路的分布参数。

如果受到机器结构等条件的限制, 不允许做直线布置, 仍可遵循电路信号的顺序按一定路线排列, 或排列成某个角度, 或双排并行排列, 或围绕某一中心元件适当布设。以每个功能电路的核心元件为中心, 围绕它来进行布局。元器件应均匀、整齐、紧凑地排列在 PCB 上, 尽量减少和缩短各元器件之间的引线和连接。

### (2) 按电路性能及特点的排列方法

① 如果由于整机要求必须将整个电路分成几块安装时, 则应使每一块装配好的印制电路板成为独立的功能电路, 以便于单独调整、检验和维护。

② 在布设高频电路元件时, 应注意元件之间的距离越小越好, 引线要短而直。

③ 对于推挽电路、桥式电路等对称性电路元器件的排列, 应注意元器件布设位置和走线的对称性, 使对称元器件的分布参数也尽可能一致。

④ 在电路中高电位的元件应排列在横轴方向上, 低电位的元件应排列在纵轴方向上, 这样可以减少高电位元件对低电位元件的干扰。

⑤ 将低电平的模拟电路和数字电路分开, 避免模拟电路、数字电路和电源公共回线产生公共阻抗耦合。

⑥ 高、中、低速逻辑电路在 PCB 上要占用不同的区域。

⑦ 安排电路时要使得信号线长度最小。

⑧ 防电磁干扰的滤波器要尽可能靠近 EMI 源, 并放在同一块电路板上。

⑨ 印制板按频率和电流开关特性分区, 噪声元件与非噪声元件要距离再远一些。

⑩ 如果遇到干扰电路靠近放大电路的输入端, 在布设时若无法拉开两者的距离, 则可改变相邻的两个元件的相对位置, 以减小脉动及噪声干扰, 如图 13-10 所示。

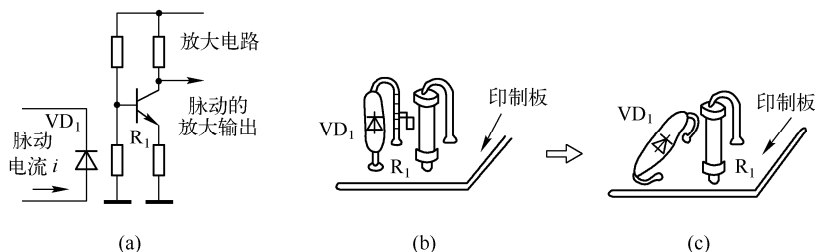


图 13-10 改变相邻元件的相对位置

### (3) 从结构工艺上考虑元器件的排列方法

印制电路板是元器件的支撑主体, 元器件的排列主要是印制板上元器件的排列, 其结构工艺应注意以下几点:

① 在一般情况下, 所有元器件均布置在印制板的一面, 以便于加工、安装和维护。对于单面印制板, 元器件只能安装在没有印制电路的一面, 元器件的引线通过安装孔焊接在印制导线的接点上。对于双面印制板, 元器件也尽可能安装在板的一面。

② 为防止印制板组装后的翘曲变形, 元器件的排列要尽量对称, 重量平衡, 重心尽量靠板

子的中心或下部,采用大板子组装时,还应考虑在板子上使用加强筋。重量超过 15g 的元器件尽可能安置在印制板上靠近固定端,并降低重心,在板上要用支架或固定夹进行装卡,然后焊接。以提高机械强度和耐振、耐冲击能力,以及减小印制板的负荷和变形。

为了便于合理地布置元器件、缩小体积和提高机械强度,可在主要的印制板之外再安装一块“辅助板”,将一些笨重元器件如变压器、扼流圈、大电容器、继电器等安装在辅助底板上,这样有利于加工和装配。对于印制板不能承载的元件,应在板外用金属托架安装,并注意固定及防止振动。

③ 元器件在板子上应排列整齐,不应随便倾斜放置;轴向引出线的元器件一般采用卧式跨接,使重心降低,有利于保证自动焊接时的质量。对于组装密度大、电气上有特殊要求的电路,可采用立式跨接,同尺寸的元器件或尺寸相差很小的元器件的插装孔距应尽量统一,跨距趋向标准化,便于元件引线的折弯和插装机械化。

④ 对于电位器、可调电感线圈、可变电容器、微动开关等可调元件的布局应考虑整机的结构要求。若是机内调节,应放在印制板上便于调节的地方;若是机外调节,其位置要与调节旋钮在机箱面板上的位置相适应。

⑤ 在元器件排列时,元器件外壳或引线到印刷板的边缘距离不得小于 2mm。在一排元件或部件中,两相邻元器件外壳之间的距离应根据工作电压来选择,但不得小于 1mm。

#### (4) 按元器件的特点及特殊要求合理排列

① 在印制电路板上布置逻辑电路时,原则上应在出线端子附近放置高速电路,稍远处放置低速电路和存储器等。电路板中最快速度的逻辑元件若比 TTL 的速度慢时,器件布置一般不会发生有害影响。而光电隔离器、隔离变压器和滤波器等通常皆应放在更靠近出线端子的地方。

② 磁场较强的元件(变压器及某些电感器件),在放置时应注意其周围应有适当的空间或采取屏蔽措施,以减小它对邻近电路(元件)的影响。它们之间应注意放置的角度,一般应相互垂直或成某一角度放置,不应平行安放,以免相互影响。

③ 某些元器件或导线之间可能有较高的电位差,应加大它们之间的距离,以免放电引起意外短路。高压元器件或导线,在排列时要注意和其他元器件保持适当的距离,防止击穿与打火。

④ 尽可能靠近整流二极管放置调压元件和滤波电容器。

⑤ 发热元器件应放在有利于散热的位置,必要时可单独放置在整机的机箱底板上或安装散热器,以降温 and 减少对邻近元器件的影响。热敏元件应远离发热元件。

### 3. 典型电路元器件布局

#### (1) 稳压电源

多数电子设备中都有稳压电源,它是设备的能源供给部分,主要特点是重量大、工作温度高、容易产生电网频率干扰;有高压输出时对绝缘要求较高;输出低压大电流时,对导线及接点有规定要求。因此,在元器件布局时,应考虑的主要问题如下:

① 电源中的主要元器件,如电源变压器、滤波电容器、泄放电阻等,体积和重量都大,布局时应放置在金属水平底座上,与整机的机械紧固要牢。底座一般用钢质材料,除保证机械强度外,还常用作公共地线。

② 电源中发热元件较多,如大功率整流器件、大功率变压器、大功率调整管等,布局时应考虑通风散热,一般将它们安置在底座的后面或两侧空气容易流通的地方;调整管及整流元件应装在散热器上,并远离其他发热元件(最好装在机箱后板外侧);其他元件应远离发热体;小的元器件一般放在印制电路板上,印制板不要放在发热元件附近,应放在便于观察的地方,以利调整

和维修。

③ 电源内有电网频率的泄漏磁场，易与放大器某些部分发生交连而产生交流声。因此，电源部分应与低频放大部分隔开，或者进行屏蔽。

④ 当电源内有高压时，高压端及高压导线要注意与机架、机壳绝缘，并远离地电位的连线及结构件。控制面板上要安装高、低压开关和指示灯，各种控制器和整流器的外壳都要妥善接地。

### （2）低频放大器

低频放大电路是电子设备中常用的一种电路，它的主要特点是工作频率低，但增益较高，易受干扰产生干扰声，或由寄生反馈引起自激。因此，在元件布局时应考虑以下几个方面：

① 元件排列应整齐、美观，并便于调整与检修。在同一级里，元件应布设在晶体管或集成电路周围，地电位最好连接在一点。级间耦合电容应直接连在输入电路的基极上，以防干扰信号窜入。

② 对于前置放大级，在布局时应把第一级电路的位置远离输出级和电源部分，在连线时应注意信号线要屏蔽，其他引线不要靠近或通过该级。输入变压器也应进行屏蔽，这是因为该级输入电平最低，但增益较高，微小的干扰就能产生明显的干扰，微小的正反馈就可能形成自激。

③ 由于各种电感器件的应用，如输入、输出变压器、耦合变压器、低频扼流圈等，在布局时应采取措施防止电磁耦合造成的干扰。例如，变压器之间、变压器与其他元器件、变压器与底板等在排列时都要相互垂直；变压器与钢质底座之间应留有一定的空间，两变压器之间无法拉开距离时，可分别放在金属底板的上、下两面，对个别变压器或特别敏感的元件实行单独屏蔽等。

④ 要抑制电源的影响，每级电路的集电极回路与电源之间都要消除通过电源内阻和馈线产生的级间耦合。有交流电流通过的导线，最好不要靠近放大器，如果不能避免的话，必须做成绞线，但仍要注意远离前置级，以免产生交流声干扰。

⑤ 扬声器的接地引线应该接在印制电路板功放级的接地点上，切勿任意接地。

### （3）中频放大器

在元器件布局时，应注意各级发射极电阻和旁路电容接地点与基极偏置电阻和退耦电容的接地点最好接在一起。

### （4）高频放大器

高频放大器也是电子设备中常见的电路，它的主要特点是：工作频率较高（一般为几兆赫兹～几十兆赫兹），若增益也比较大时，电路的工作稳定性很容易受到影响，主要是由于电路元件的布置所产生的分布参数（如引线电感、寄生电容，接地电阻等），使电路原来的参数发生变化，导致电路不能正常工作。因此，在布置元器件时应注意以下几点：

① 在高频下工作的电路，要考虑元器件之间的分布参数。一般电路应尽可能使元器件平行排列。这样，不但美观，而且装焊容易，易于批量生产。

② 元器件布置应尽量紧凑，要有利于连接并且连线最短，必要时可将元件直接组装在开关上，形成波段转换组装件。易受干扰的元器件不能相互挨得太近，输入和输出元件应尽量远离。

③ 高频电路中的安装件（包括机械固定或绝缘保护所需要的）的布置，要考虑它们与高频回路元件之间的位置、距离及带来的影响。若距离很近时会不同程度地改变回路的分布参数，影响电路的性能。常将流过高频电流的导线和元件架空，离开底座。另外，每一件安装件都要保证牢固可靠；若遇振动、冲击，则不允许发生相对位移，以避免分布参数的改变给电路带来的不良影响。

④ 高频电路的接地十分重要。元件就近接地，能减短接地引线，使引线电感和分布电容变



小,对抑制各种寄生耦合也是有益的,频率愈高,此优点愈显著。尽量做到一点接地,将每级电路中的高频回路元件以及其他有关的元件集中在一点接地,可以有效地限制本级电流只在本级范围内流通,大大减小高频电流流入底座(或大面积铜箔地线)的分量,同时有利于抑制底座上大的地电流对电路的不良影响;当这两种接法有矛盾时,可根据具体情况灵活运用,通过试验效果来确定。其次是接地性能必须良好,若接地不良,接地电阻增大,地电流在其上的压降增大,形成不可忽视的干扰。

#### 4. 元器件布局的检查

- (1) 印制板尺寸是否与加工图纸尺寸相符? 是否符合 PCB 制造工艺的要求? 有无定位标记?
- (2) 元件在二维、三维空间上是否有冲突?
- (3) 元件布局是否疏密有序、排列整齐? 是否全部布完?
- (4) 需经常更换的元件能否方便地更换? 插件板插入设备是否方便?
- (5) 热敏元件与发热元件之间是否有适当的距离?
- (6) 可调元件的调整是否方便?
- (7) 在需要散热的地方,装了散热器没有? 空气流是否通畅?
- (8) 信号流程是否顺畅且互连最短?
- (9) 插头、插座等与机械设计是否矛盾?
- (10) 线路的干扰问题是否有所考虑?

### 13.1.3 印制电路板上的导线

#### 13.1.3.1 印制导线的尺寸和图形

在印制电路板的设计中,当元件布局和布线初步确定后,就要具体地设计与绘制印制板图形。这时必然会遇到印制导线宽度、导线间距等设计尺寸的确定以及图形的格式等问题。设计尺寸和图形格式不能随便选择,它关系到印制板的总尺寸和电路性能。

##### 1. 印制导线的宽度

印制导线具有电阻,通过电流时将产生热量和电压降。通过导线的电流愈大,温度愈高。导线如长期受热后,铜箔会因粘贴强度降低而脱落。因此,要控制工作温度就要控制导线的电流。一般可采用导线的最大电流密度不超过  $20\text{A}/\text{mm}^2$ ,建议导线宽度优先采用  $0.5\text{mm}$ 、 $1.0\text{mm}$ 、 $1.5\text{mm}$  和  $2.0\text{mm}$  等几种规格。电源线的走线宽度  $\geq 1\text{mm}$ 。

信号路径的宽度从驱动到负载应该是常数。改变路径宽度时路径阻抗会改变,从而产生反射和造成线路阻抗不平衡。所以最好保持导线宽度不要突变。当导线宽度超过  $3\text{mm}$  时,最好在导线中间开槽成两根并联线,如图 13-11 所示。



图 13-11 在导线中间开槽

##### 2. 印制导线的间距

在高压电路中,相邻导线间存在着高电位梯度,必须考虑导线间的距离对抗电强度的影响。印制导线间的击穿将导致基板表面炭化、腐蚀和破裂。在高频电路中,导线间的距离将影响分布电容的大小,从而影响着电路的损耗和稳定性。

导线间距的选择应根据基板材料、工作环境、分布电容大小、加工方法等因素来确定。一般情况下,建议导线间距等于导线宽度,最小导线间距应不小于  $0.4\text{mm}$ 。采用浸焊或波峰焊时,间距要大一些,手工焊间距可小一些。

### 3. 印制导线的走线形式

#### (1) 直角走线

直角走线一般是 PCB 布线中要求尽量避免的情况，也几乎成为衡量布线好坏的标准之一。那么直角走线究竟会对信号传输产生多大的影响呢？从原理上说，直角走线会使传输线的线宽发生变化，造成阻抗的不连续。直角走线对信号的影响主要体现在三个方面：一是拐角可以等效为传输线上的容性负载，减缓上升时间；二是阻抗不连续会造成信号的反射；三是直角尖端产生 EMI。

由于印制板的铜箔粘结强度有限，印制导线的图形如设计不当，往往会造成翘起或剥脱。所以印制导线应走向平直，不应有急剧的弯曲和出现尖角（参见图 13-12）。

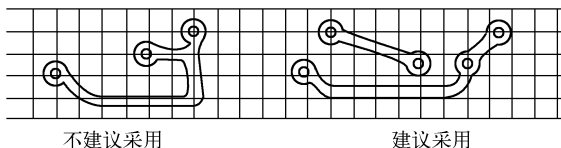


图 13-12 不应有急剧的弯曲和出现尖角

#### (2) 差分走线

差分信号在高速电路设计中的应用越来越广泛，电路中最关键的信号往往都要采用差分结构设计。差分信号就是驱动端发送两个等值、反相的信号，接收端通过比较这两个电压的差值来判断逻辑状态“0”还是“1”。而承载差分信号的那一对走线就称为差分走线。

差分信号和普通的单端信号走线相比，最明显的优势体现在以下方面：

① 抗干扰能力强。因为两根差分走线之间的耦合很好，当外界存在噪声干扰时，几乎是同时被耦合到两条线上，而接收端关心的只是两信号的差值，所以外界的共模噪声可以被完全抵消。

② 时序定位精确。由于差分信号的开关变化是位于两个信号的交点，而不像普通单端信号依靠高低两个阈值电压判断，因而受工艺、温度的影响小，能降低时序上的误差，同时也更适合于低幅度信号的电路。目前流行的 LVDS (Low Voltage Differential Signaling) 就是指这种小振幅差分信号技术。

对于 PCB 工程师来说，最关注的还是如何确保在实际走线中能完全发挥差分走线的这些优势。差分走线的一般要求就是“等长、等距”。等长是为了保证两个差分信号时刻保持相反极性，减少共模分量；等距则主要是为了保证两者差分阻抗一致，减少反射。“尽量靠近原则”有时候也是差分走线的要求之一。

在 PCB 电路设计中，一般差分走线之间的耦合较小，往往只占 10%~20% 的耦合度，更多的还是对地的耦合，所以差分走线的主要回流路径还是存在于地平面。当地平面发生不连续的时候，无参考平面的区域，差分走线之间的耦合才会提供主要的回流通路。尽管参考平面的不连续对差分走线的影响没有对普通的单端走线来的严重，但还是会降低差分信号的质量，增加 EMI，要尽量避免。

差分走线也可以走在不同的信号层中，但一般不建议这种走法，因为不同的层产生的诸如阻抗、过孔的差别会破坏差模传输的效果，引入共模噪声。此外，如果相邻两层耦合不够紧密的话，会降低差分走线抵抗噪声的能力，但如果能保持和周围走线适当的间距，串扰就不是个问题。在一般频率 (GHz 以下)，EMI 也不会是很严重的问题，实验表明，相距 500mil 的差分走线，在 3m 之外的辐射能量衰减已经达到 60dB，足以满足 FCC 的电磁辐射标准。

#### (3) 蛇形线

蛇形线是 Layout 中经常使用的一类走线方式，见图 13-13。其主要目的就是为了调节延时，

满足系统时序设计的要求。PCB 上的任何一条走线在通过高频信号的情况下都会对该信号造成延时,蛇形走线的主要作用是补偿“同一组相关”信号线中延时较小的部分,最典型的就是时钟线,通常它不需经过任何其他逻辑处理,因而其延时会小于其他相关信号。

高速数字 PCB 的等线长是为了使各信号的延迟差保持在一个范围内,保证系统在同一周期内读取的数据的有效性(延迟差超过一个时钟周期时会错读下一周期的数据),一般要求延迟差不超过  $1/4$  时钟周期。单位长度的线延迟差也是固定的,延迟跟线宽、线长、铜厚、板层结构等有关,但线过长会增大分布电容和分布电感,使信号质量下降所以时钟 IC 引脚一般都接 RC 端接。但蛇形走线并非起电感的作用,相反,电感会使信号中的高次谐波相移,造成信号质量恶化,所以要求蛇形线间距最少是线宽的两倍,信号的上升时间越小就越易受分布电容和分布电感的影响。

下面是给 Layout 工程师处理蛇形线时的几点建议:

① 尽量增加平行线段的距离 ( $S$ ),至少大于  $3H$ ,  $H$  指信号走线到参考平面的距离。通俗地说就是绕大弯走线,只要  $S$  足够大,就几乎能完全避免相互的耦合效应,见图 13-14,布线均匀整齐,走线转弯角度大于  $135^\circ$ 。

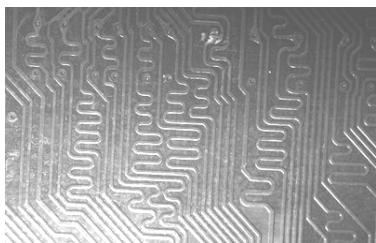


图 13-13 蛇形走线

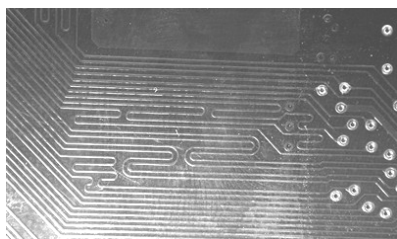


图 13-14 走线转弯角度大于  $135^\circ$

② 对于高速以及对时序要求较为严格的信号线,蛇形线没有所谓滤波或抗干扰的能力,只可能降低信号质量,所以只作时序匹配之用。尽量不要走蛇形线,尤其不能在小范围内蜿蜒走线。

③ 可以经常采用任意角度的蛇形走线,能有效地减少相互间的耦合。

④ 有时可以考虑按螺旋走线的方式进行绕线。仿真表明,其效果要优于正常的蛇形走线。

⑤ 印制导线应尽可能避免有分支,见图 13-15。

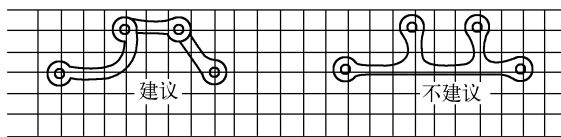


图 13-15 印制导线避免有分支

#### 4. 印制接点的形状尺寸

印制接点是指印制在樺接孔周围的金属部分,供元件引线和跨接线焊接用。接点的尺寸取决于樺接孔的尺寸。樺接孔是指固定元件引线或跨接线面贯穿基板的孔,显然,樺接孔的直径应稍大于元件的引线直径。樺接孔径的大小与工艺有关,当樺接孔径大于或等于印制板厚度时,可用冲孔;当樺接孔径小于印制板厚度时,可用钻孔。焊盘直径应大于樺接孔。

印制电路板图形接点的形状可分为三种形式:岛形接点、圆形接点与方形接点。

(1) 岛形接点 具有岛形接点的印制电路板,多应用在高频电路中。它可以减少接点和印制导线的电感,增大地线的屏蔽面积,以减少接点间的寄生耦合。

(2) 圆形接点 具有圆形接点的印制电路多用于低频及一般电路中。它由圆形焊盘及导线组成, 导线走向直观、明确。

(3) 方形接点 具有方形接点的印制电路多应用于低频电路。它的焊点与导线区别不明显。由于不需画图, 因此绘制比较方便。适用于手工描版或刀刻。加工精度要求低, 应用得较少。

### 13.1.3.2 PCB 布线技术

在印制电路板设计中, 产品设计师往往只注重提高密度, 减小占用空间, 制作简单; 或追求美观、布局均匀, 忽视了线路布局对防干扰的影响, 使大量的信号辐射到空间形成干扰。一个拙劣的 PCB 布线能导致更多的电磁兼容问题, 而不是消除这些问题, 到最后, 不得不对整个板子重新布线。因此, 在开始时养成良好的 PCB 布线习惯是最省钱的办法。

有一点需要注意, PCB 布线没有严格的规定, 也没有能覆盖所有 PCB 布线的专门的规则。大多数 PCB 布线受限于电路板的大小和覆铜板的层数。一些布线技术可以应用于一种电路, 却不能用于另外一种, 这主要依赖于布线工程师的经验。

在 PCB 设计中, 以布线的设计过程限定最高, 技巧最细、工作量最大。PCB 布线有单面布线、双面布线及多层布线。布线的方式也有两种: 自动布线及交互式布线。当进行单面或双面板(这意味着没有电源面和地线面)的布线时, 先人工布好地线, 然后将关键信号, 如高速时钟信号或敏感电路, 靠近它们的地回路布置, 最后对其他电路进行布线。

在自动布线之前, 可以用交互式预先对要求比较严格的线进行布线, 输入端与输出端的边线应避免相邻平行, 以免产生反射干扰。必要时应加地线隔离, 两相邻层的布线要互相垂直, 平行容易产生寄生耦合。自动布线的规则可以预先设定, 包括走线的弯曲次数、导通孔的数目、步进的数目等。一般先进行探索式布经线, 快速地把短线连通, 然后进行迷宫式布线, 先把要布的连线进行全局的布线路径优化, 它可以根据需要断开已布的线。并试着重新再布线, 以改进总体效果。

目前高密度的 PCB 设计出现了盲孔和埋孔技术, 它不仅完成了导通孔的作用, 还省出许多布线通道使布线过程完成得更加方便、更加流畅、更为完善。PCB 的设计过程是一个复杂的过程, 要想很好地掌握它, 还需广大电子工程设计人员自己去体会, 才能得到其中的真谛。

#### 1. PCB 布线的一般原则

下面便是避免 PCB 布线分布参数影响而应该遵循的一般要求。

##### (1) 应减小电路分布参数

电路分布参数是影响整机性能的主要因素之一。在布线时必须设法减小电路的分布参数, 如连接线应尽量地短, 尤其是高频电路的连线更要短而直, 使分布电容和分布电感减至最小; 工作于高速数字电路的导线也不能太长, 否则会使脉冲信号前、后沿变差。信号线和信号回路线所形成的环路面积要最小; 主要信号线最好汇集在板中央; 时钟发生电路力求布设在靠近中央的部位; 为避免信号线之间的串音, 两条信号线切忌平行, 而应采取垂直交叉方式, 或者拉开两线之间的距离, 也可以在两条平行的信号线之间增设一条地线; 尤其应注意与外界相连、向外发送信号的信号线, 虽然这种线本身并不产生辐射, 可是处理不当易把干扰信号接收进来, 起类似天线的作用。总之, 必须根据具体情况周密考虑, 妥善布局。

##### (2) 避免相互干扰

对于不同用途的导线, 布设时不应紧贴或合扎在一起。例如, 输入信号线和输出信号线以及

电源线；低电平信号线与高电平信号线；交流电源线与滤波后的直流馈电线；不同回路引出的高频线；继电器电路内小信号系统的接点连线与线包接线或功率系统接点连线；电视中行脉冲输出线与中频通道放大器的信号连线等，这些线最好的处理方法是相互垂直交叉走线，也可将它们分开一定的距离或在它们之间设置地线，作简单的隔离。公用电源向各级的馈线应分开，并应有各自的去耦电路。有时，为了减小相互耦合和外界干扰的影响，常采用绞合线的走线方法，可有近似于同轴电缆的功能。

### （3）抑制电源线和地线阻抗引起的振荡

当印制电路板上较多的集成电路器件，如存储器的驱动电路和计数电路等同时工作时会使电路板内的电源电压和地电位波动，导致信号波形产生振荡而引起电路误动作。对于这种情况，可采用下面两种措施：一种是在各个集成器件的电源线和地线间分别接入旁路电容器，以缩短开关电流的流通途径；另一种是把电源线和地线线条设计成格子形状，而不用梳子形状。格子形状能显著缩短线路的环路，降低线路阻抗，从而减少干扰。有时只用一种措施的效果还不够充分，则要兼用两种，方能显著地提高印制电路板的噪声容限。

印制电路板上装有多多个集成电路，而且其中有些元件耗电很多时，地线上会出现较大电位差，这时应把地线设计成封闭环路，这种方式没有电位差，可以有更高的噪声容限。另外，地线和电源线的走向与数据传输方向一致时，印制电路板的噪声容限往往高于一般情况，因此，可以把这一因素考虑在电路板印制导线图案的设计中。

使用 TTL 电路的微型计算机等设备大多采用四层左右的多层印制电路板。多层板结构以中间层作电源线和地线，能够大幅度降低接地电位差，减少电源线阻抗和信号线之间的串音。但当没有多层板，或根据实际情况不得不使用双面印制电路板时，必须尽量加粗地线线条的宽度，或者采用小型母线，并应多备几个引线插头供地线使用。很多时候，把母线驱动器和接收器设置在输入、输出端子附近，对防止噪声侵入印制电路板很起作用。

### （4）应满足装配工艺的要求

① 在电性能允许的前提下，应使相互平行靠近的导线形成线束，以压缩导线布设面积，做到走线有条不紊、外观上整齐美观，并与元器件布局相互协调。

② 布设时应将导线放置在安全和可靠的地方，一般的处理方法是将线束固定于机座，保证线路结构牢固和稳定，耐振动和冲击。

③ 走线时应避开金属锐边、棱角和不加保护地穿过金属孔，以防导线的绝缘层遭到破坏，造成短路故障。走线还应远离发热体（如功率管、变压器、功率电阻等），一般在 13mm 以上，以防导线受热变形或性能变差。

④ 导线布设应便于元器件或装配件的查看、调整和更换。对于可调元器件，导线长度应留有适当的裕量，对于活动部位的线束，要具有相适应的活动范围。

### （5）高频电路避免“飞线”

高频电路应避免用外接导线跨接。若需要交叉的导线较多，最好采用双面印制板，将交叉的导线印制在板的两面，这样可使连接导线短而直。用双面板时，两面印制线应避免互相平行，以减小导线的寄生耦合，最好成垂直布置或斜交，见图 13-16。

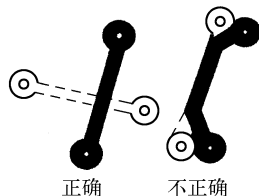


图 13-16 双面印制板的布线

### (6) 按信号的传输顺序布线

为减小导线间的寄生耦合,布线时要按照信号的传输顺序排列,尽可能将输入、输出端安排在远离的位置,输入与输出之间用地线隔开。图 13-17 (a) 的安排,由于输出、输入靠得过近,且输出导线过长,将会产生耦合。而图 13-17 (b) 的布局则比较合理。

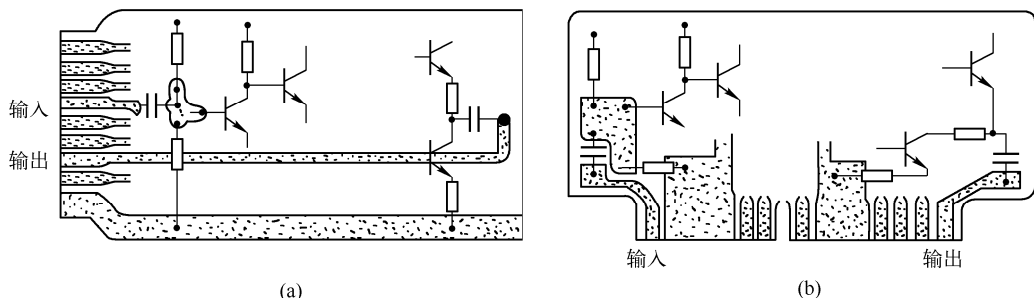


图 13-17 电路布局

### (7) 设置保护与分流线路

在时钟电路中,局部去耦电容对于减少沿着电源干线的噪声传播有着非常重要的作用。但是时钟线同样需要保护,以免受其他电磁干扰源的干扰,否则,受扰时钟信号将在电路的其他地方引起问题。

设置分流和保护线路是对关键信号(比如,对在一个充满噪声的环境中的系统时钟信号)进行隔离和保护的有效方法。PCB 内的分流或者保护线路是通过沿着关键信号的线路两边布放隔离保护线来实现的。保护线路不仅隔离了由其他信号线上产生的耦合磁通,而且也将关键信号线与其他信号线的相互耦合隔离开来。

分流线路与保护线路之间的不同之处在于分流线路不必两端端接(与地连接),而保护线路的两端则都必须连接到地。为了进一步减小耦合,多层 PCB 中的保护线路可以每隔一段就加上到地的通路。

#### 2. 印制板上的地线设计

在 PCB 板的地线设计中,接地技术既应用于多层 PCB,也应用于单层 PCB。接地技术的目标是接地阻抗最小化。由于对所有的信号线都实现最佳地线布线是不可能的,在设计时应重点考虑最重要的部分。从 EMI 的角度考虑,最重要的信号是电流变化率高的信号,如时钟线、数据线、大功率方波振荡器等。从敏感度的角度考虑,最重要的信号是前后沿触发输入电路、时钟系统、小信号模拟放大器等。一旦将这些重要信号分离出来,就可以把设计的重点放在这些电路上。

在产品的设计过程中,一个有效的工具是地线图。这是一张关于设备中所有地线连接的图,它包括所有的地参考点和地路径(通过机箱、电缆屏蔽层、走线、导线等)。这张图中仅有地线,其他电路可以简化。在产品开发的整个过程中,这张图的制作、保存和实施都由指定的防干扰设计师来执行。

#### (1) 地线形状

##### ① 地线网格

地线网格使地线电感对任何信号而言都保持最小。这种地线结构特别适用于数字电路,如图 13-18 所示。在进行电路板布线时,应首先将地线网格布好,然后再进行信号线和电源线的布线。当进行双面板布线时,如果过孔的阻抗可以忽略,可以在电路板的一面走横线,另一面走竖线。高速信号线尽量靠近地线,以减小环路面积。

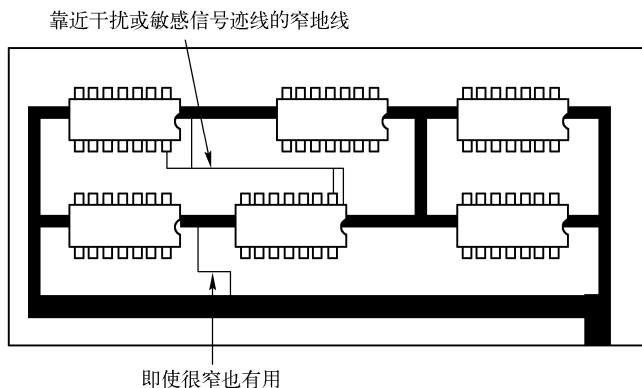


图 13-18 地线网格

地线网格并不适合低频小信号模拟电路，因为这时要避免公共阻抗耦合。为了降低对静电放电的敏感性，一个低阻抗的地线网格是很重要的，但是必须与主参考地结构连接起来，这种连接可以是间接的（通过电容器），也可以是直接的。

在高速数字电路中，有一种地线方式是必须避免的，这就是“梳状”地线，如图 13-19 所示。这种地线结构使信号回流电流的环路很大，会增加辐射和敏感度。

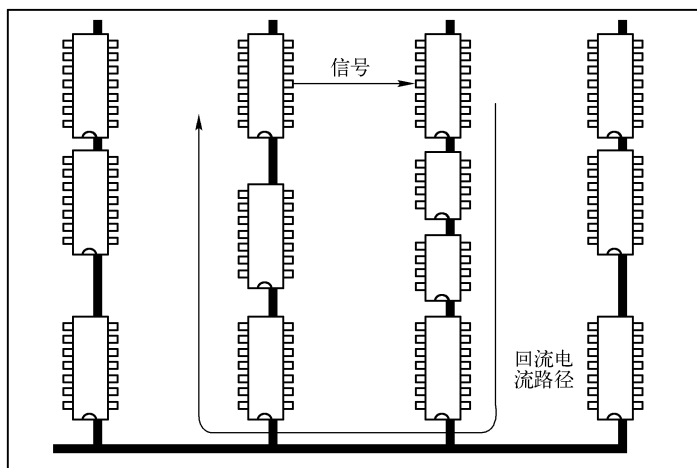


图 13-19 “梳状”地线

## ② 地线面。

地线网络的极端形式是平行的导线无限多，构成了一个连续的导体平面，这个平面称为地线面。这在多层板中很容易实现，它能提供最小的电感。这种结构特别适合于射频电路和高速数字电路。通常的四层板中还专门设置一个电源面，它能够在高频时提供一个低的“源—地”阻抗。

值得注意的是，从防干扰的角度看，地线面的主要作用是减小地线阻抗，从而减少地线干扰。地线面和电源面的屏蔽作用是很小的，特别是当器件安装在电路板表面时，几乎没有屏蔽作用，将地线面和电源面布置在外层几乎没有什么好处。

双层板上使用地线面不是简单地将没有用到的面积上布上铜箔然后连接到地线上，因为地线面的目的是提供一个低阻抗的地线，因此它必须位于需要这种低阻抗地线的信号线的下面（或上面）。在高频，回流信号并不一定走几何上最短的路径，而会走最靠近信号线的路径。这是因为这

种路径与信号线之间的环路面积最小,因此,具有最小电感和最小阻抗,所以地线面能够保证回流电流总是取最佳路径。

地线面上的电流必须是连续的,这样才能取得预期的效果。当地线面必须断开时,应在重要的信号(如时钟信号)迹线下面设置一根连线,如图 13-20 所示。因此,使用多层电路板布线,专门设置一层地线面是最简单的设计。

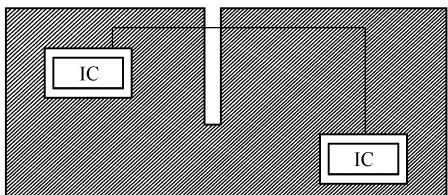


图 13-20 断开的地线面

地平面不应有大的开口,因为这些开口如同平行导线一般,其作用等同于环路天线。地线面上因分开数字地和模拟地而需要开槽时,高速信号线不应跨越槽缝,以免环路面积扩大,因为电流总是走阻抗最小的途径。高频时,电流走环路电感最小的途径,环路面积越小,环路电感就越小。但如果高速信号线跨过槽缝,则回流

线被迫绕过槽缝,使环路面积加大。必要时可以在槽上架“桥”,例如,A/D 变换器就可置于桥上,其“地”脚如果在模拟地一侧,数字信号的回流就可过“桥”回到地脚,从而保持环面积最小。此“桥”也可用电容器架设。

此外,还应避免将连接器安装在槽缝上,因为如果两侧存在较大的地电位差,就会通过外接电缆产生共模辐射。

地线面还能有效地控制串音,这是一种系统内的防干扰问题。地线面由于使不同的信号回路不在一个平面内,因而对减少电感耦合也有好处。地线面能够使辐射的环路最小,这保证了 PCB 的最小差模辐射和对外界干扰的敏感度。当不使用地线面时,为了达到同样的效果,必须在高频电路或敏感电路邻近设置一根地线。

## (2) 地线布置形式

① 串联型。按原理图顺序逐级分段使用地线,见图 13-21 (a)。

② 并联型。各级使用一个地线分支,然后有一总的地线联接,见图 13-21 (b)。

③ 串并联型。根据电原理图,相互靠近或相互影响极小的级则串联使用地线,有相互影响的则采取分支地线,见 13-21 (c)。

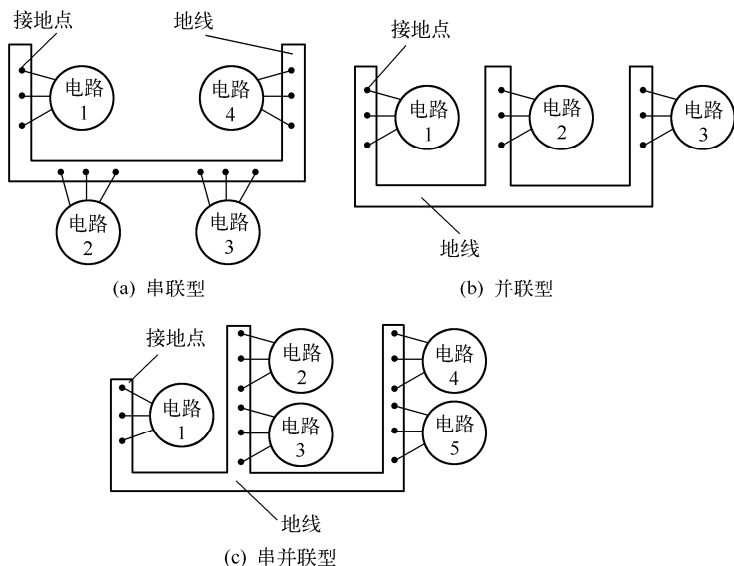


图 13-21 地线布置的 3 种形式



### (3) 地线的布设要点

① 在低频电路中, 信号的工作频率小于  $1\text{MHz}$ , 布线和器件的电感影响较小, 而接地电路形成的环流对干扰影响较大, 因而应采用一点接地。每个电路单元都有自己的单独地线, 因此不会干扰其他电路单元。图 13-22 (a) 为电路各级间分别采取一点接地的原理示意图。在实际布线时并不能绝对做到, 而是使它们尽可能就近安排在一个公共区域之内, 见图 13-22 (b)。

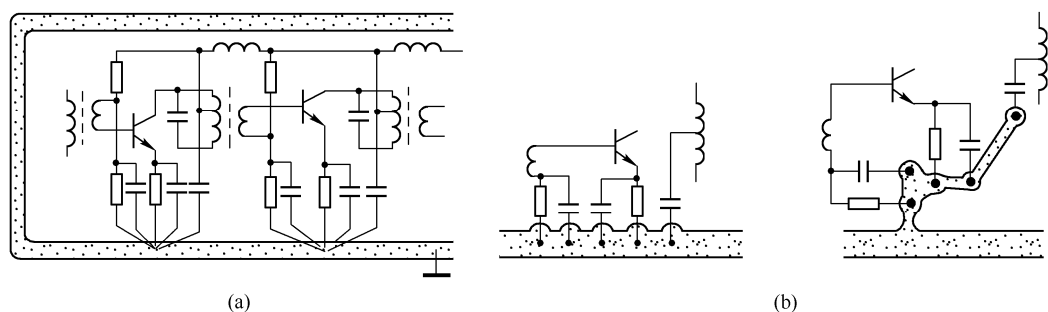


图 13-22 地线的布设

② 当信号工作频率大于  $13\text{MHz}$  时, 就不能使用一点接地的方法。因为地线具有电感, 采用一点接地的方法会使地线增长、阻抗加大, 还会构成各接地线之间的相互耦合而产生干扰, 因此, 对高频设备为减小地线阻抗, 往往采用多点接地, 以使电路单元的电流经地线回到电源的途径有许多条, 借以减小地线阻抗及高频电流在流经地线时产生的辐射干扰。

③ 当电路工作频率在  $30\text{MHz}$  以上或在高速开关的数字电路中, 为了减小地阻抗, 常采用大面积覆盖地, 这时各级的内部元器件接地也应贯彻一点接地的原则, 即在一个小的区域内接地, 见图 13-23。

④ 当工作频率在  $1\sim 13\text{MHz}$  时, 如果采用一点接地, 其地线长度不应超过波长的  $1/20$ , 否则应采用多点接地法。高频电路宜采用多点串联接地, 地线应短而粗, 高频元件周围尽量布置栅格状大面积接地铜箔。

⑤ 在单层 (单面) PCB 中, 接地线的宽度应尽可能宽, 至少为  $1.5\text{mm}$ 。

⑥ 在双层 (双面) PCB 中, 对于数字电路优先使用地线栅格或点阵布线。这种布线方式可以减小接地阻抗、接地回路和信号环路。地线和电源线的宽度最少应为  $1.5\text{mm}$ 。另外的一种布局是将接地层放在一边, 信号和电源线放于另一边。这种布置方式将进一步减少接地回路和阻抗。此时, 去耦电容可以放置在距离 IC 供电线和接地层之间尽可能近的地方。

⑦ 在多层 PCB 中, 推荐把电源面和接地面尽可能近地放置在相邻的层中, 以便在整个板上产生一个大的 PCB 电容。速度最快的关键信号应当临近接地面的一边, 非关键信号则布置靠近电源面。

⑧ 对多级放大电路, 不论其工作频率相近或相差较大, 一般允许其电源地回路线相互连接后引出一根公共地线接到电源的地端, 但不允许后级电路的大电流通过前级的地电流流向电源的负极。

⑨ 一般将公共地线布置在印制板的最边缘, 既便于印制板安装在机架上, 也便于与机架 (地) 相连接。导线与印制板的边缘应留有一定的距离, 这不仅便于安装导轨和进行机械加工, 而且还提高了绝缘性能。

⑩ 电路板上既有高速逻辑电路, 又有线性电路, 应使它们尽量分开, 而两者的地线不要相混, 要分别与电源端地线相连。要尽量加大线性电路的接地面积。设计只由数字电路组成的印制电路板的地线系统时, 将接地线做成闭环路可以明显提高抗噪声能力, 因而常常在印制板周边布

一圈宽的地线。

⑪ 当电路需要不止一个电源供给时,采用接地将每个电源分离开。但是在单层 PCB 中多点接地是不可能做到的。一种解决方法是把从一个电源中引出的电源线和地线同其他的电源线和地线分隔开,这同样有助于避免电源之间的噪声耦合。

### 3. 局部屏蔽技术

对电路板上的强辐射电路或高度敏感电路需要采取局部屏蔽。电路板上局部屏蔽的方法是:利用电路板上的一层表面的铜箔作为屏蔽盒的一个面,在这个面上安装一个五面体的金属盒,该五面体金属盒以很密(1cm 以下)的间隔与作为另一个面的铜箔连接起来,构成一个完整的六面体屏蔽盒。

电路板局部屏蔽能否成功的一个关键因素是屏蔽界面的选择是否合理。选择屏蔽界面的主要原则有两个:

(1) 穿过屏蔽界面的导线数量最少

(2) 所有穿过屏蔽界面的导线都需要滤波 电路板上的导线滤波可以采用贴片电容,安装在导线穿过屏蔽体的界面上,如果为了防止屏蔽盒内的干扰辐射到盒外来,滤波电容应安装在内侧;如果为了防止外界干扰进到盒子里面,滤波电容应安装在盒子的外侧。三端贴片电容是最适合这种应用场合的元件。

硅橡胶和聚乙烯可以用作印制板屏蔽衬垫,适合于印制板丝网漏印技术。印制导线如需要屏蔽,在要求不高时可采用印制屏蔽线,如图 13-24 所示,在信号线外设置屏蔽地线。

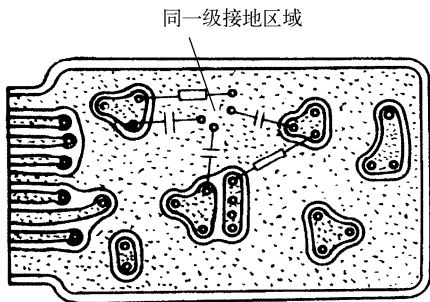


图 13-23 大面积覆盖地

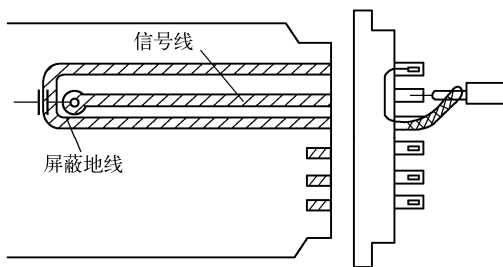


图 13-24 在信号线外设置屏蔽地线

### 4. 模拟数字混合电路板的设计

如何降低数字信号和模拟信号间的相互干扰呢?有两个基本原则:第一个原则是尽可能减小电流回路的面积;第二个原则是系统只采用一个参考面。相反,如果系统存在两个参考面,就可能形成一个偶极天线(注:小型偶极天线的辐射大小与线的长度、流过的电流大小以及频率成正比);而如果信号不能通过尽可能小的环路返回,就可能形成一个大的环状天线(注:小型环状天线的辐射大小与环路面积、流过环路的电流大小以及频率的平方成正比)。在设计中要尽可能避免这两种情况。

了解电流回流到地的路径和方式是优化混合信号电路板设计的关键。许多设计工程师仅仅考虑信号电流从哪儿流过,而忽略了电流的具体路径。如果必须对地线层进行分割,而且必须通过分割的地线层之间的间隙布线,则可以先在被分割的地线之间进行单点连接,形成两个地线之间的连接桥,然后再通过该连接桥布线。这样,在每一个信号线的下方都能够提供一个直接的电流回流路径,从而使形成的环路面积很小。

采用光隔离器件或变压器也能实现信号跨越分割间隙。对于前者,跨越分割间隙的是光信号;在采用变压器的情况下,跨越分割间隙的是磁场。还有一种可行的办法是采用差分信号,即信号从一条信号线流入,而从另外一条信号线返回,在这种情况下,不需要“地”作为回流路径。

在实际工作中,一般倾向于使用统一“地”,将 PCB 分区为模拟部分和数字部分。模拟信号在电路板所有层的模拟区内布线,而数字信号在数字电路区内布线。在这种情况下,数字信号返回电流不会流入到模拟信号的“地”。只有将数字信号布线在电路板的模拟部分或者将模拟信号布线在电路板的数字部分时,才会出现数字信号对模拟信号的干扰。这样的布局布线既满足了 IC 器件厂商对模拟地和数字地引脚低阻抗连接的要求,同时又不会形成环路天线或偶极天线而产生 EMC 问题。

混合信号 PCB 设计是一个复杂的过程,设计过程要注意以下几点:

- (1) A/D 转换器跨分区放置。
- (2) 不要对“地”进行分割。在电路板的模拟部分和数字部分下面敷设统一“地”。
- (3) 在电路板的所有层中,数字信号只能在电路板的数字部分布线;模拟信号只能在电路板的模拟部分布线。
- (4) 实现模拟与数字电源分割。
- (5) 必须跨越分割电源之间间隙的信号线要位于紧邻大面积“地”的布线上。

#### 5. 其他布线细则

(1) 虽然树型排列适用于多个 PCB 印制电路板的地线连接,但它带有能产生多个短截线的信号路径。因此,应该避免用树型排列高速和敏感的信号线。辐射型信号排列通常有最短的路径,以及产生从源点到接收器的最小延迟,但是这也能产生多个反射和辐射干扰,所以应该避免用辐射型排列高速和敏感信号线。

(2) 时钟电路和高频电路是主要的干扰和辐射源,一定要单独安排、远离敏感电路。将敏感的高频线布设在远离高噪声电源线的地方,以减少相互之间的耦合。时钟发生器尽量靠近使用该时钟的器件,用地线将时钟区圈起来。

(3) 所有的金属化填充区应该被连接到地,否则,这些大的金属区域能充当辐射天线。

(4) 在特别敏感的器件之间较长的电源线或信号线应每隔一定间隔与地线的位置对调一下。对调的含义是将一根导线从上移到下面,或从左边移到右边,另一根导线则做相反的调整。对调有关导线后,只有较小的环路存在。

(5) 使回线尽量与信号线平行并靠近。不管是对多层 PCB 的基准接地层还是单层 PCB 的地线,电流的路径总是从负载回到电源。由于流动在负载和电源之间的射频电流的影响,长的返回通路将在彼此之间产生射频耦合,因此,返回通路应当尽可能短,环路区域应当尽可能小。

(6) 弱信号电路、低频电路周围不要形成电流环路。

(7) 使用镜像平面来消除电源或地平面产生的干扰对电子电路所造成的影响。

(8) 总线驱动器应紧挨其欲驱动的总线。对于那些从印制电路板引出的引线,驱动器应紧紧挨着连接器。

(9) 石英晶体下面以及对噪声敏感的器件下面均不要走线,石英晶体振荡器外壳要接地。

(10) 过孔一般被使用在多层印制电路板中。过孔产生  $1\sim 4\text{nH}$  的电感和  $0.3\sim 0.5\text{pF}$  的电容。因此,当铺设高速信号通道时,过孔应该被保持最少。对于高速的并行线(如地址和数据线),如

果层的改变不可避免, 应该确保每根信号线的过孔数目相同。

(11) 发热元件周围或大电流通过的引线要尽量避免使用大面积铜箔, 否则, 长时间受热时,

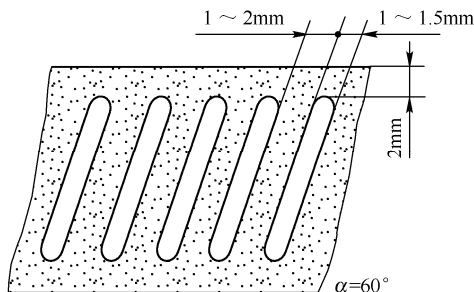


图 13-25 大面积的铜箔应按空域栅状

易发生铜箔膨胀和脱落现象。必须用大面积铜箔时, 最好用栅格状, 见图 13-25。这样在浸焊时能迅速加热, 并保证涂锡均匀。此外还能防止 PCB 受热变形, 防止铜箔翘起和剥脱。

总之, 应使板上各部分电路之间不产生干扰, 都能正常工作, 对外辐射发射和传导发射尽可能低, 外来干扰对板上电路不产生影响。

#### 6. 设计检查规则

布线设计完成后, 需认真检查布线设计是否符合设计者所制定的规则, 同时也需确认所制定的规则

是否符合印制板生产工艺的要求。一般检查有如下几个方面:

(1) 线与线、线与元件焊盘、线与贯通孔、元件焊盘与贯通孔、贯通孔与贯通孔之间的距离是否合理, 是否满足生产要求。

(2) 电源线和地线的宽度是否合适, 电源与地线之间是否紧耦合 (低的波阻抗), 在 PCB 中是否还有能让地线加宽的地方。

(3) 对于关键的信号线是否采取了最佳措施, 如长度最短、加保护线、输入线及输出线被明显地分开。

(4) 模拟电路和数字电路部分, 是否有各自独立的地线。

(5) 后加在 PCB 中的图形 (如图标、注标) 是否会造成信号短路。

(6) 对一些不理想的线形进行修改。

(7) 在 PCB 上是否加有工艺线? 阻焊是否符合生产工艺的要求, 阻焊尺寸是否合适, 字符标志是否压在器件焊盘上, 以免影响电装质量。

(8) 多层板中的电源地层的外框边缘是否缩进, 如电源地层的铜箔露出板外容易造成短路。

### 13.1.4 印制电路板的对外连接

#### 13.1.4.1 用导线互连

将需要对外连接的接点, 先用印制导线引到印制电路板的一端, 导线应从被焊点的背面穿入樁接孔, 如图 13-26 所示。

对于有特殊需要的接点 (如高频高压) 外连导线时, 应根据需要在合适的位置引出, 不应与其他导线一起走线, 以避免相互干扰。图 13-27 为高频屏蔽导线的外接方法。

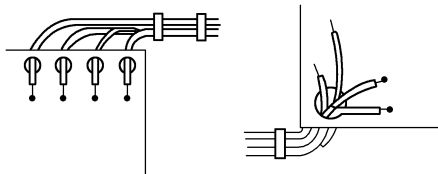


图 13-26 导线互连

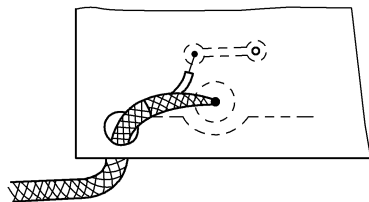


图 13-27 高频屏蔽导线的外接方法

### 13.1.4.2 印制电路板插座式互连

#### (1) 簧片式插头与插座

在印制电路板的一端制成插头,以便插入有接触簧片的插座中去,参见图 13-28。

#### (2) 针孔式插头与插座

在针孔式插头的两边设有固定孔与印制电路板固定,在插头上有  $90^\circ$  弯针或与印制板垂直,其一端与印制电路板接点焊接,另一端可插入插座内,参见图 13-29。

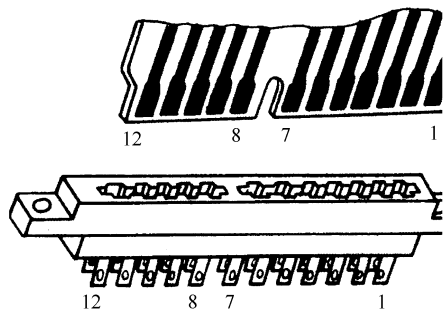


图 13-28 簧片式插头与插座

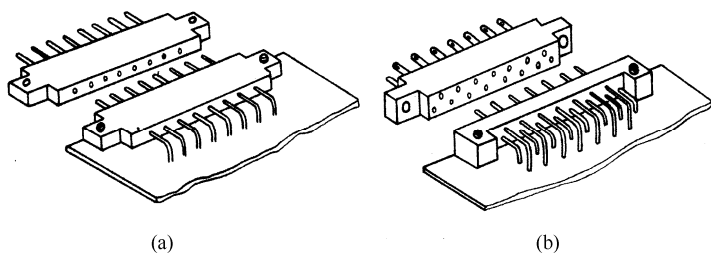


图 13-29 针孔式插头与插座

## 13.2 印制基板的制造与检验

### 13.2.1 刚性印制板的制造及检验技术

目前,大批量生产印制电路板普遍采用丝网漏印和感光晒板法制作印制电路板。除此之外还有其他制作印制板的方法,如快速电脑雕刻法,将电脑设计好的图形输入雕刻机,直接在覆铜板上钻孔、雕刻导电图形、加工外形及异型槽孔等,再经过孔金属化、镀铅锡合金等工序即可获得高质量的印制板。这种方法制板周期短,仅几小时即可完成。

#### 13.2.1.1 印制板的制造方法和工艺流程

##### 1. 印制板的制造方法分类

(1) 减去法 以覆铜板为基础,选择性地除去不需要的导电铜箔而形成导电图形的工艺,称为减去法。目前国内几乎所有的印制板企业都使用此法生产 PCB。

(2) 加成法 在未覆铜箔的基材上,通过选择性沉积导电材料而形成导电图形的工艺,称为加成法。日本等国家小部分企业用此法生产 PCB。

(3) 半加成法 在未覆铜箔基材或薄箔基材上,用化学沉积金属,结合电镀或蚀刻,或者三者并用形成导电图形的一种加成法工艺。日本等国家小部分企业用此法生产 PCB。

##### 2. 单面板的基本制造工艺流程

单面板的印制图形比较简单,一般采用丝网漏印的方法转移图形,然后蚀刻出印制板,也有采用光化学法生产的,其生产工艺流程如下所示。

覆箔板→下料→烘板(防止变形)→制模→洗净、烘干→贴膜(或网印)→曝光显影(或抗腐蚀油墨)→蚀刻→去膜→电气通断检测→清洁处理→网印阻焊图形(印绿油)→固化→网印标

记符号→固化→钻孔→外形加工→清洗干燥→检验→包装→成品。

### 3. 双面板的基本制造工艺流程

#### (1) 图形电镀工艺流程

覆箔板→下料→冲钻基准孔→数控钻孔→检验→去毛刺→化学镀薄铜→电镀薄铜→检验→刷板→贴膜(或网印)→曝光显影(或固化)→检验修板→图形电镀(Cu+Sn/Pb)→去膜→蚀刻→检验修板→插头镀镍镀金→热熔清洗→电气通断检测→清洁处理→网印阻焊图形→固化→网印标记符号→固化→外形加工→清洗干燥→检验→包装→成品。

流程中“化学镀薄铜→电镀薄铜”这两道工序可用“化学镀厚铜”一道工序替代,两者各有优缺点。

#### (2) 裸铜覆阻焊膜(SMOBC)工艺

SMOBC板的主要优点是解决了细线条之间的焊料桥接短路现象,同时由于铅锡比例恒定,比热熔板有更好的可焊性和储藏性。

制造SMOBC板的方法很多,有标准图形电镀再退铅锡的减去法SMOBC工艺;用镀锡或浸锡等代替电镀铅锡的图形电镀减去法SMOBC工艺;堵孔或掩蔽孔法SMOBC工艺;加成型SMOBC工艺等。下面主要介绍图形电镀法再退铅锡的SMOBC工艺和堵孔法SMOBC工艺流程。

##### ① 图形电镀法再退铅锡的SMOBC工艺法相似于图形电镀法工艺。只在蚀刻后发生变化。

双面覆铜箔板→按图形电镀法工艺到蚀刻工序→退铅锡→检查→清洗→阻焊图形→插头镀镍镀金→插头贴胶带→热风整平→清洗→网印标记符号→外形加工→清洗干燥→成品检验→包装→成品。

##### ② 堵孔法主要工艺流程如下:

双面覆箔板→钻孔→化学镀铜→整板电镀铜→堵孔→网印成像(正像)→蚀刻→去网印料、去堵孔料→清洗→阻焊图形→插头镀镍、镀金→插头贴胶带→热风整平→清洗→网印标记符号→外形加工→清洗干燥→成品检验→包装→成品。

此工艺的工艺步骤较简单、关键是堵孔和洗净堵孔的油墨。在堵孔法工艺中如果不采用堵孔油墨堵孔和网印成像,而使用一种特殊的掩蔽型干膜来掩盖孔,再曝光制成正像图形,这就是掩蔽孔工艺。它与堵孔法相比,不再存在洗净孔内油墨的难题,但对掩蔽干膜有较高的要求。

SMOBC工艺的基础是先制出裸铜孔金属化双面板,再应用热风整平工艺。

### 4. 多层PCB的生产流程

多层PCB的生产流程实际上是使用数片双面板,并在每层板间放进一层绝缘层后粘牢(压合)而成。它的层数通常都是偶数,并且包含最外侧的两层。多层印制板一般采用环氧玻璃布覆铜箔层压板。为了提高金属化孔的可靠性,应尽量选用耐高温的、基板尺寸稳定性好的、特别是厚度方向热膨胀系数较小的,且与铜镀层热膨胀系数基本匹配的新型材料。

#### (1) 传统多层PCB的生产工艺流程

传统多层PCB生产工艺流程如下所述:

各层图形胶片制备(各层胶片图形分别制备;所有层叠层对位检查;制定位孔;各层胶片按要求分类放置待用)→材料准备(覆箔薄板、半固化片下料;长宽取向垂直、数量各半)→各覆铜薄板冲制或用高速数控钻钻定位(销钉)孔、铆钉孔→抛光处理→各覆铜薄板分别完成图形制作→各电路板分别氧化处理→清洗烘干→各内层电路板板间加半固化片按要求叠层,注意最外两层无图形及板材取向→铆合→层压→找正、恢复定位孔→数控加工导通孔→去污→孔金属化处理、电镀加厚铜→制作最外层图形→通断检测、金属化工艺孔金相检测→制阻焊层、

印字符(SMOBC)→喷锡、清洗→产品检测。

### (2) HDI(高密度互连印制板)的工艺流程

① UV 激光微线钻是近几年才进入我国的多功能工艺设备,专门针对 HDI 的特点,完成快速加工。快速 HDI(UV 激光)工艺流程如下:

各层覆铜薄板、半固化片材料准备→1、2层(最中间双面层)烧蚀出图形:制蝶形或双菱形靶标;激光刻图→清洁、电路板表面氧化处理→叠片、层压3、4层→激光钻盲孔→盲孔直接电镀→金属化用黑孔化或钯处理,电镀铜加厚→烧蚀出图形→清洁、电路板表面氧化处理→叠片、层压5、6层→激光钻盲孔→盲孔直接电镀→烧蚀出图形→如此反复往上叠层,直至所需层数→激光钻通孔、盲孔→直接电镀→烧蚀出图形→清洁处理→检验→涂布阻焊层、印字符→烧蚀出焊盘→印活性焊剂→激光加工外形→测试、检验。

### ② 直接电镀工艺流程如下:

刷板→清洁剂110开缸(阴极移动)10~15min→沥干、喷淋→整孔剂201开缸(阴极移动)15~20min→沥干、喷淋、沥干→黑孔液开缸(阴极移动)20~30min→沥干、压缩气吹、用胶刮刮除表面碳黑→烘固温度100~110℃,30~50min→弱蚀(去表面沾污碳黑层)→清洗、浸稀酸、喷淋→酸性镀铜20~30min,1~1.5A/dm<sup>2</sup>→喷淋→镀锡(如用活性焊剂,可不走此工序)→喷淋清洗、烘干。

## 13.2.1.2 原版底片及其制作方法

### 1. 原版底片的用途和要求

原版底片是印制电路板生产的前道工序,原版底片的质量直接影响印制板的生产质量。在生产某种印制电路板时,至少必须有一套相应的原版底片。印制板的每种导电图形(信号层电路图形和地、电源层图形)和非导电图形(阻焊图形和字符)至少都应有一张菲林底片。通过光化学转移工艺,将各种图形转移到生产板材上去。

#### (1) 原版底片在印制板生产中的用途

- ① 图形转移中的感光掩膜图形,包括线路图形和光致阻焊图形。
- ② 网印工艺中的丝网模板的制作,包括阻焊图形和字符。
- ③ 机加工(钻孔和外型铣)数控机床的编程依据及钻孔参考。

随着电子工业的发展,对印制板的要求也越来越高。印制板设计的高密度,细导线,小孔径趋向越来越快,印制板的生产工艺也越来越完善。在这种情况下,如果没有高质量的原版底片,就不能够生产出高质量的印制电路板。

#### (2) 现代印制板生产要求原版底片需要满足的条件

① 原版底片的尺寸精度必须与印制板所要求的精度一致,并应考虑生产工艺所造成的偏差而进行补偿。

- ② 原版底片的图形应符合设计要求,图形符号完整。
- ③ 原版底片的图形边缘平直整齐,边缘不发虚;黑白反差大,满足感光工艺要求。
- ④ 原版底片材料应具有良好的尺寸稳定性,即由于环境温度和湿度变化而产生的尺寸变化小。
- ⑤ 双面板和多层板的原版底片,要求焊盘及公共图形的重合精度高。
- ⑥ 原版底片各层应有明确的标志或命名。
- ⑦ 原版底片片基能透过所要求的光波波长,一般感光需要的波长范围是 $3 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-7} \text{m}$ 。

就印制电路板的生产而言,不管用什么方法都离不开合乎质量要求的1:1的原版底片(在生产过程中还要将原版底片翻版成生产底片)。获得原版底片的途径基本上有两种:一种是利用计算机

辅助设计系统和光绘机直接制出原版底片；另一种是先制作照相底图，再经拍照后得到原版底片。

## 2. 计算机光绘法获得原版底片

CAD 光绘法是用计算机自动布线后，驱动光绘机，使底片曝光，经暗室操作后得到原版底片。这种方法虽然是比较理想的，但需要比较复杂的设备和具有一定设计水平的技术人员，而且整个过程还需人工参与设计和人工填写或输入数据等，相当费时。CAD 光绘法适用于那些高层数的多层印制板和高密度的、人工制作照相底图很困难的双面印制板。至于层数不多的多层印制板及一般的双面印制板的原版底片，完全可用先制作照相底图，再经拍照的方法获得。

## 3. 照相法获得原版底片

由照相底图拍照获得原版底片，自然首先要制作照相底图。制备照相底图必须高标准、严要求，因为这将直接反映成品印制板的精度。制备照相底图通常用 2:1 及 4:1 的比例，这样照相底图板反映出的制图公差就减小到比较满意的数值，对于一些特别复杂的图形，通常使用 8:1 或 6:1 的比例。

### (1) 制备照相底图通常使用的三种材料

① 布里斯托尔板。这种板所使用的材料，重量中等，价格低，吸墨性能优越，尺寸稳定性也比较好；但只适合于平均公差比较宽的单面印制板。

② 铝箔板。材料贵，但极为稳定，吸墨性能好。

③ 聚酯薄膜。价格合适，将聚酯薄膜的一面进行粗化处理，专门为制图用；它有极为优越的稳定性，有不透明和半透明的两种。为了在粗化处理的面上绘制图形，研制了专用绘图墨汁，提高了聚酯薄膜的吸墨能力，制图中半透明薄膜材料的优点在于直接从布线图中拍摄照相底图，双面板可以背对背地进行检验。此外照相加工中可以使用后照光。

### (2) 照相底图的制作（可以自动，也可以人工）

#### ① 自动制作照相底图。

a. CAD 笔绘法。首先由 CAD 系统布好线，之后，由驱动笔绘机画出照相底图。这种方法尽管精确度较高，但图纸本身的尺寸稳定性差，墨迹不均匀，反差不够。

b. 打印法。它是根据布线草图控制打印机打印出照相底图。这种方法的缺点是打印纸本身稳定性差，反差不够。另外，由于打印机打出的线和连接盘图形是由点阵组成的，因此轮廓不整齐，横线、竖线和斜线差别较大，这对于密度较高的底图很难适应。

② 手工制作照相底图。在印制板生产中，手工制作照相底图普遍采用两种方法：一种是在铜版纸上用墨描图，墨汁必须质量好，并应避免图形干燥后出现的开裂或细线裂纹的现象，也应避免图形发亮引起照相时的反光。这种制作方式适用于单面和简单双面印制电路板，而对安装中大规模集成电路和多层印制板就有一定难度。另一种是采用胶带和干式一转移的胶粘焊点盘来制图的方法。这种方法是在透明聚酯膜上，用预制图形和精细胶带贴印制板照相图，不仅效率高，而且质量好、精度高，这种贴图法作为一种主要方法在印制板生产中广泛应用。

胶带具有黑、红、蓝三种颜色，并分为两种尺寸系列。一般选用黑色胶带，这种胶带为皱纹纸材料制成，弹性小，不易收缩。胶带宽度为 0.3~1.5mm，可供选择。

### 13.2.1.3 照相底图的贴图技术要求

#### 1. 贴图技术要求

##### (1) 胶带与焊盘的连接

当胶带与空心焊盘相连接时，胶带的一端要贴到焊盘的空心处。当胶带与实心焊盘连接时，



胶带的一端可贴到焊盘的直径附近,如图 13-30 所示。

当胶带需在焊盘附近与焊盘根连时,应采用图 13-31 (a) 的方式,而不采用图 13-31 (b) 的方式,因为后者易被认为是生产过程中造成的短路。



图 13-30 胶带与空心焊盘相连接



图 13-31 胶带需在焊盘附近与焊盘根连

在一个焊盘上不应有图 13-32 所示的两条以上胶带重叠。

#### (2) 胶带与胶带的连接

一条胶带在中途除了可与焊盘连接外,胶带与胶带之间不得有接头。

当胶带成 T 字形连接时,采取图 13-33 (a) 的形式,而不采取图 13-33 (b)、(c) 的形式;以重叠胶带宽度方向的 2/3 为好。

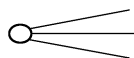


图 13-32 两条以上胶带重叠

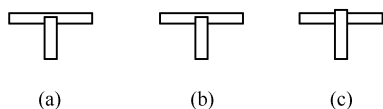


图 13-33 胶带与胶带的连接

#### (3) 胶带的拐弯

当图形密度不是很高,拐弯角度较小,且胶带不是很宽时,可采取圆弧状。在拐角处不能把胶带切断而拼起来,也不允许把拐角处贴成锐角,因为在生产过程中,由于机械擦、刷等操作,会使尖角部分的铜箔翘起而影响电性能。

#### (4) 定位标记

定位孔是印制电路板制作时作加工基准用的。根据定位精确度要求的不同,有不同的定位方法。印制电路板上的定位孔,应该用专门的图形符号表示。当要求不高时,也可采用印制电路板内较大的装配孔代替。图 13-34 给出了四种定位方法。图 13-35 给出了四种定位孔图形符号的画法。

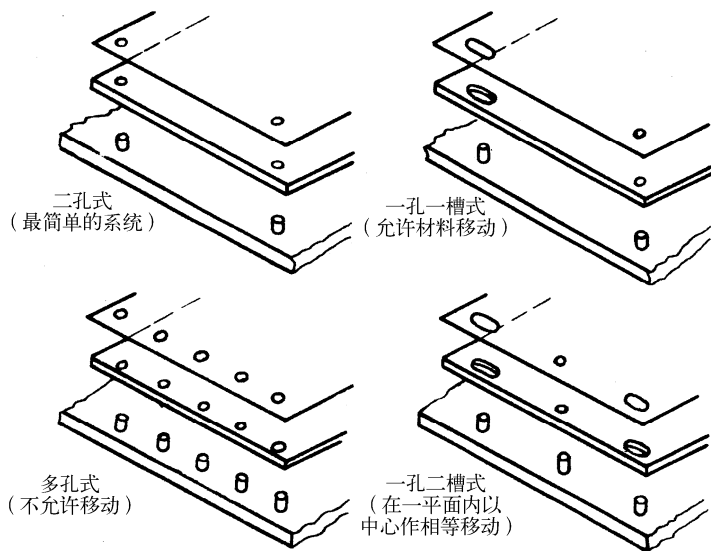


图 13-34 四种定位方法



图 13-35 四种定位孔图形符号的画法

照相底图上定位标记可以是印制板在加工过程中定位孔的位置，也可以只是底图和照相底片的定位标记，其外形如图 13-36 所示。也可用其他形状的定位标记。定位标记应设置在印制电路板边框线外，一般采取三孔偏置定位，并且孔边缘与印制电路板边框线间的距离不小于 5mm。

#### (5) 贴图方法

通常贴照相底图采用三种方法：三层贴法、双层贴法和一层两面贴法，均是指贴双面印制板的照相底图。三层贴法是普遍采用的方法，它是单独贴一张焊盘图形，再分别用两张聚酯膜来贴两面的导体图形。这样，一套取面印制板的照相底图由三张图组成（不包括阻焊图和绘印字符图），所以称为三层贴法。下面具体介绍三层贴法。

① 贴焊盘图形。把坐标网格放在下面，上面放元器件分布图（一张透明膜）并用定位尺固定。首先在边框以外贴三个定位标记，并且中心都要对准网格交点。接下来贴各种焊盘图形和印制插头图形等，各种焊盘中心要对准网格交点。

② 贴导体图形。贴好焊盘图形后，取下元件图换上导体分布图。在焊盘图形上面再放一张透明聚酯膜，首先根据导体分布图用胶带贴元件面的导体图形和各种字符及印制板名称等。按规定贴上符号“CS”，表示元件面。贴好元件面的导体图形后取下来，换一张透明膜，对照焊接面的导体图贴图形；与元件面的不同之处在于所有字符包括表示焊接面的符号“SS”都要贴在背面。

③ 胶带的贴法。在印制板照相底图上，胶带用得是比较多的。胶带贴得好坏直接影响成图的质量。在贴胶带时，首先要注意，不要把胶带拉得过紧，免得贴上去后回缩，而使该连接的部位断开。另外，还要考虑到走线的美观。在不影响电气性能的条件下，尽量走线整齐。

当需要将胶带切断时，不要用刀子在底图上切，以免切出刀痕。而应该在需要切断处，把胶带从底图上拉起来，然后用刀子切断，再使断口处贴在底图上。

对于 1mm 以下的胶带，在需要拐弯处用刀子切个口，使其保留五分之一不断，然后就可以随意拐弯了，见图 13-37 (a)。当胶带较宽时，则需在拐弯处切出一个直角口，口子大小根据拐弯角度而定，见图 13-37 (b)。用这种办法贴上去的胶带，拐弯处很光滑，不会脱开。



图 13-36 定位标记

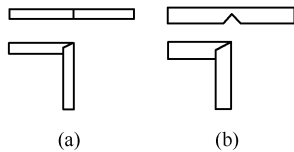


图 13-37 胶带的贴法

#### (6) 检查与测量

对贴好的照相底图进行检查和测量是非常必要的。检查的部分包括正确性检查、工艺检查和标准化检查。正确性检查是以布设草图为准的，检查时可把布设草图放在贴好的底图一面，看草图上的图形是否都被底图上的各种焊盘图形和胶带掩盖住了。如果没有露线的地方，证明没有漏贴。同时也要检查有无多贴和错贴，以及胶带是否有回缩和断开之处。工艺检查主要看是否符合设计规范和生产工艺本身的要求。

对于照相底图的测量也要仔细进行。主要是测量照相缩小尺寸是否准确、比例是否相符,印制插头部位尺寸是否准确,线宽、线间距是否符合要求,等等。如果不符,都要进行修改。

### 2. 印制电路板的照相技术

要做出高质量的印制板,底片是很重要的。如果底片反差不好,沙眼很多,又有灰雾,势必给制板及各道生产工序带来很多不便和质量问题。摄制照相底版的精确度,取决于照相机的性能和照相材料的稳定性。

(1) 照相工艺流程 对光→曝光→显影→定影→水洗→晾干→修复。

(2) 翻片工艺 翻片是由翻片机进行的。翻片时,光源最好采用平行光,底片的药面要对准软片的药面,这样可使做出来的图形线条光滑无毛刺;同时要将底片压紧,以防止出现虚影和局部线条变粗发黑;时间要控制适当,不能太长,否则将影响底片反差。

翻片时曝光的显影和定影工艺与照相的显影、定影工艺相同。借助于光抗蚀剂方法,就可直接用负像的照相底版来生产印制板,而对于网印工艺,则需要正像底版。

#### 13.2.1.4 印制电路板的印制和蚀刻

印制-蚀刻法,就是用防护性抗蚀材料在敷铜板上形成图形(正性的),那些没有被抗蚀材料防护起来的不需要的铜箔,随后经化学蚀刻而被去掉。蚀刻后,将抗蚀层除去,这样,就留下由铜箔构成的所需的复制图形。

制造抗蚀或电镀的掩膜图形一般有三种方法,即液体感光胶法、感光干膜法和丝网漏印法。感光胶法(蛋白感光胶和聚乙烯酸感光胶)是一种比较老的工艺方法,它的缺点是生产效率低,难于实现自动化,本身耐蚀性差。

丝网漏印法适用于批量较大、精度要求高的单面和双面印制板生产,便于实现自动化。感光干膜法在提高生产效率,简化工艺,提高印制板质量等方面优于其他方法。目前,在图形电镀制造电路板工艺中,大多数厂家都采用感光干膜法和丝网漏印图形法。

##### 1. 感光干膜法制造工艺

###### (1) 贴膜制板工艺流程

贴膜前处理→吹干或烘干→贴膜→对孔→定位→曝光→显影→晾干→修板。

① 贴膜前处理。在贴膜前将板材刷洗干净,去除氧化膜、油污等,以增加干膜与铜箔表面的结合力,否则将会引起干膜脱落与边缘起翘等。刷洗一般用刷板机。

② 贴膜。贴膜主要借助贴膜机进行。贴膜温度对贴膜质量影响比较大。温度过高,易使子膜流胶和发脆。因此,要严格控制贴膜温度。温度的选择与干膜性能、气候条件有关,一般为 90~130℃,夏季要再低 13~20℃。

选择适当的贴膜压力也是非常重要的。压力过小,干膜与铜箔结合不牢,影响制板质量;反之,膜易变形起皱。在生产过程中,要根据经验选择压力大小。贴膜速度太快,膜易起皱,无法制出合格图形;反之,会使贴膜不牢。

③ 曝光。曝光对印制板质量影响很大。光源类型、曝光时间的长短、光源的强弱,对制成图形线条的粗细及精度产生直接影响。若曝光过量,会造成显影困难,甚至细线条显不出影;反之,线条边缘发毛,会出现渗镀现象。

曝光时,应严格控制曝光量。曝光量与光源的强弱、灯距的远近、曝光时间长短等有关。在光源选定的情况下,决定曝光量的因素有两个:一个是灯距,另一个是时间。若灯距远,曝光时间就要相应加长,反之,曝光时间要短。但光源距离过近,会对干膜显影带来困难。因此,光源

的距离要合适，一般通过实验来确定。

④ 显影。显影一般在显影机里进行。显影溶液采用无水碳酸钠，浓度为 1%~2%。操作程序是：曝光后的印制板去掉聚酯膜，放在显影机里进行显影，印制板首先进入喷淋 2%稀碳酸钠溶液中显影，然后进入水中冲洗干净，最后在盛有 1%的碳酸钠溶液的容器中再次显影。显影的时间不能太长，时间太长会造成过显，使边线不整齐；时间太短会使显影不彻底，密集线条部分显不出图像。显影溶液的浓度要严格控制，太稀，显影速度慢，不易显示出图像；浓度太高，显影速度过快，易造成导线边缘不整齐。

⑤ 修板。修板时，要用小毛笔沾沥青修补缺陷、沙眼等，孔偏移比较严重的要修好，使其达到技术要求。

## （2）蚀刻技术

蚀刻是指利用化学或电化学方法，对涂有抗蚀剂并经感光显影后的印制电路板上未感光部分的铜箔腐蚀除去，在印制板上留下精确的线路图形。

对印制电路板有多种蚀刻剂及工艺可以采用，这些材料和方法可以除去未保护部分的铜箔，但不影响感光显影后的抗蚀剂及其保护下的铜导体，也不腐蚀绝缘基板及黏结材料。工业上最常用的蚀刻剂有三氯化铁、铬酸及氯化银。其中三氯化铁价廉，毒性较低，碱性氯化铜腐蚀速度快，能蚀刻高精度、高密度的印制板，铜离子又能再生回收。

蚀刻方法有摇槽法、浸蚀法和喷蚀法三种。摇槽法最简单，所用的设备是一只放蚀刻剂的槽，装于不断摇动的台面上。浸蚀法是将工件浸没在盛有能保温的大槽中蚀刻。喷蚀法生产速度较快，用泵将蚀刻剂喷于印制板表面进行蚀刻加工。

当蚀刻成形完成后，将印制电路板进行水洗和清洁处理。这道工艺很重要，否则留下的干燥盐类附着到印制电路的基底上，在潮湿条件下，将会进一步发生蚀刻反应，导致绝缘故障。

## 2. 丝网漏印工艺

丝网漏印（简称丝印）是一种古老的工艺。丝网漏印法，是先将所需要的印制电路图形制在丝网上，然后用油墨通过丝网版将线路图形漏印在铜箔板上，形成耐腐蚀的保护层，经过腐蚀，去除保护层，最后制成印制电路板。由于它具有操作简单、生产效率高、质量稳定及成本低廉等优点，所以广泛用于印制板制造。当前用丝印法生产的印制板，占整个印制板产量的大部分。

目前，丝印法制印制板在工艺、材料、设备上都有较大突破，现在已能印制出 0.2mm 的导线。其缺点是，所制的印制板的精度比光化学法的差；对品种多、数量少的产品，要求丝印工人具有熟练的操作技术。

### （1）丝网准备

① 制备丝网的材料。丝网是丝网网版的载体，是支撑感光胶膜、控制印刷油墨量的重要工具，它决定了印制板的精度和质量。丝网的材料很多，有真丝网、尼龙丝网和不锈钢丝网等。网框有木质、中空的铝合金、铸铝、钢铁等。木制框易吸水变形，已逐渐被金属框替代。金属框具有尺寸稳定、强度高、寿命长等优点。

② 黏合剂是用于绷网时把丝网黏合在框架上的材料。对黏合剂的要求是：黏合力强，对有机溶剂具有良好的稳定性。

### （2）绷网

绷网是将丝网拉紧固定到框架。一般分手工绷网及机械绷网两种。绷网的质量直接影响图形的印制质量和丝网的使用寿命，因而要求绷紧、绷均匀及张力大小保持在一定范围内。绷网前将

丝网用水浸泡,以利于绷均匀。金属网用火烧一下,以除去油污并使表面纯化,以增强结合力。

手工绷网操作简单,使用方便,设备费用低,但不适用于高精度的产品使用。自绷式(自张式)是将丝网直接绷到框架上,由于自张网框绷紧装置和框架属于一体,可借助“螺丝调节”,故也可称为可调试张网。它适用于多品种、小批量印刷。

### (3) 丝网图形制作

制丝网图形是丝网漏印工艺中最关键的工序,直接关系到漏印的质量。制作方法基本上有四种:

① 漆膜雕刻法。此法是用一种特制的蜡纸(它上面附有一层软性清喷漆的漆膜),制作时先在蜡纸上用小刻刀把印制电路雕刻出来,形成漆膜图形,然后将漆膜图形用香蕉水转移到尼龙丝网上,制成丝网版。这种方法用得最早,比较简单,成本低。

② 锌板漆膜转移法。此法是将印制电路图形制成锌板,再使印制电路板的线条和符号凸出来。然后在锌板上涂凡士林,并均匀喷上一层皮尺漆,用双面刀片把锌板凸出的线条和符号上面的漆刮去,磨平;再喷皮尺漆,再把凸出部分的漆膜刮平,磨平,使线条和符号露出;反复几次,直至锌板的凹下部分填满皮尺漆,使漆膜与凸出部分相平为止。

③ 碳素纸感光法。碳素纸是在照相软纸上面贴上层改性明胶,制版时先将碳素纸浸入3%的重铅酸钾溶液中,浸3min,取出后将有明胶的一面贴在聚酯薄膜上,除去气泡,并用玻璃板压平,然后将欲制作的印制电路图形(经拍照后的照相软片)贴在薄膜上感光,再浸在温水中显影,照相软纸自然脱落,没有感光部分的明胶在温水中溶解。最后将有明胶的一面贴在尼龙丝网上,并用玻璃压平,自然干燥,从而制成碳素纸丝网版。

④ 直接乳剂制板法。目前,在大批量的印制板生产中,大多采用直接乳剂制板法制作丝网图形。常采用重铬酸盐系(菲林纸感光膜)、重氮系感光胶等感光材料。

a. 菲林纸感光膜制丝网图形。菲林纸感光膜,其组成部分由高分子膜剂和光敏剂两部分组成。该材料制丝网工艺简便,不受温度及湿度的影响,未加增感剂前,见光不敏感,储存方便。其主要工序如下:

a) 将绷好的网用稀碱液或无水乙醇或洗净剂等擦洗,以除去丝网上的油污,使感光胶均匀湿润,然后用清水漂洗干净。

b) 按照相底片实际尺寸,适当加余量裁剪菲林膜,用绸布或棉纱轻轻擦去膜面上的滑石粉。

c) 刷涂敏化液。

d) 将裁剪好的感光膜紧贴在涂刷敏化液的丝网上,用橡皮刮刀在聚酯膜面赶去气泡,再把药膜面余滴轻轻刮除。

e) 在45℃,约烘8~12min,用镊子轻轻剥去聚酯膜,速放入原烘箱中回烘1min,以便感光膜进一步干燥。

f) 在玻璃片上放上照相底片,再在上面盖上丝网并压紧然后进行曝光。曝光时间根据光源及灯距而定。

g) 在温水中轻轻摆动1~3min,将图形基本上显出后,再用冷水轻轻冲洗,至图形完全清晰为止。曝光过的感光膜在显影槽内将不溶于水,而被照相正片上的图形遮光的明胶薄膜在显影时将溶解于热水。

h) 干燥。

i) 用软性清漆等修补图形缺陷。然后用一种不透油墨且可溶于水的封网浆用小漆刷涂在丝网的其余部分,封网围住菲林膜,以免印制时抗蚀油墨漏到丝网下的印制板上或其四周。

### b. 重氮感光胶制丝网图形

重氮感光胶的主要优点是分辨率高、耐水及耐溶性能好、耐印次数高、无环境污染,适用于制精细的图形。主要工序如下:

- a) 用脱脂棉和洗衣粉擦拭丝网,水冲并晾干。
- b) 将胶液和重氮粉末加到乳胶中,充分搅拌后,置于阴暗处密封保存。
- c) 将配好的感光胶倒于网的一端,网倾斜,用 3~4mm 厚的有机玻璃刮刀均匀地由下而上刮两次,背面刮一次,使胶在网底形成一层厚度均匀、平滑的胶层。
- d) 涂胶→烘干,反复进行 2~3 次。
- e) 用两片磨光玻璃板,将涂胶后的丝网与照相底片叠合后置于其间,水平位置,用重物压紧。用碘钨灯曝光,时间约 5~6min,并用台扇降温。
- f) 将已曝光好的丝网版整个浸在水中,用喷枪向网底喷冲(勿向网面喷洒),然后加大喷枪压力,至图像清晰为止。
- g) 低温烘干或晾干。
- h) 使用后的网板,如果需要更换图形,需用相应的溶剂将网版的残存印料彻底刷拭后,用自来水洗净,即可重新制网版。

### (4) 印制板漏印技术

① 漏印材料。丝网漏印的印料按用途分抗蚀印料、抗电镀印料、阻焊印料及文字符号印料。按其材料类型可分为油墨、漆类及树脂等印料。按其固化形成式则可分为热固印料和光固印料。

② 刮板。刮板是丝网漏印最主要的工具。刮板材料直接影响漏印图形的质量。如果刮板硬度过大,弹性较差,会使印制板凹下部分造成印料不足,甚至图形不完整。如果刮板硬度过低,刮印时收料不干净,漏印的图形较厚,容易失真。建议用聚氨基甲酸酯做刮板,一般其厚度为 13mm,肖氏硬度为 60~70。该材料耐磨、弹性好,能漏印出精度高、清晰、不失真的图形。

③ 丝印机漏印。丝印机有半自动丝印机和全自动丝印机。半自动丝印机用机械传动来实现印刷,丝网框架张合、刮印及回辅印料动作靠机械动作完成,而送料、取料等靠人工完成。全自动丝印机的送料、定位、取料、添加印料等都靠机械自动完成。

丝网漏印法,除大量用来印制电路板之外,还用来在印制板绝缘底板那一面漏印插装元件时所用的标记图样。

丝网漏印法也常用来印制焊接点的掩膜印刷(涂覆阻焊剂)。在印制板插装元件后,只有焊接点处有插入的元件引线头需要与印制电路的焊接点用焊锡焊接,所以整个印制板只需将所有焊接点(焊盘)暴露在外面,其他部分用一种抗焊涂料涂覆,就可以避免全部上锡,这在自动焊接工艺中如浸焊法和波峰焊中更有意义。由于只有焊盘外露,所用焊料要少得多,还防止了焊接时的桥连、搭焊造成短路,以减少返工,减少虚焊,并起防护作用,使印制板不受机械损伤,不受潮湿及大气环境的侵蚀。

### 13.2.1.5 印制电路板的机械加工

印制电路板如果用的是已经剪切的单个小板,就可以直接钻元件小孔和安装孔。但在批量生产上,采用单个小板,印制定位困难,影响产品质量稳定,故常采用几块不同种类的印制板在一块大板上印制,蚀刻加工,再剪切分开。机械加工工艺步骤如下:

#### 1. 落料

用剪床把已蚀刻好图形的印制板剪开;裁剪时,铜箔面要向上。在单一品种、大批量的场合,

可以采用一次冲孔和落料的冲模,一次完成,但是对多品种生产就不经济。少量生产都是用手工加工外形,再用钻孔的方法,其成本最低。

## 2. 钻孔

质量优良的印制板必须具有良好、清洁、无毛刺的孔。为了获得高质量的孔,就必须统筹考虑采用合适的钻头、钻床、转速、垫板及覆铜层压板。

### (1) 钻头

加工印制电路板一般采用硬质合金钻头,它具有良好的耐热性和高硬度,但较脆,易折断。

### (2) 钻床

钻床分为手工操作的和数控的两类。

① 手工操作。用手工钻床钻孔,工件定位按下述两种方法之一来进行:借助光学的视力定位法或用钻孔模板定位法。用光学的视力定位法确定孔的位置,要求对孔的位置加以限定要么用底图盖在工件上的办法来解决,要么用一个已有明确焊盘位置的印制电路复制件的办法来解决。钻孔模板定位法往往采用光致抗蚀剂,因为显影出来的图形足以能走出孔的位置,而且几块板材可以叠在一起,并与照相底版对准,将要钻孔的工件与钻孔模板销在一起。这类钻床,其通常钻头是从下往上钻的。上述两种定位方式均可用手工多轴钻床,操作员既可移动钻轴,又可移动工作台,而不是工件。

② 数字控制。事先编好程序,然后用数控钻床进行加工,是目前的主流加工方式。

### (3) 转速

钻床转速的快慢直接影响钻孔的质量。一般情况孔大转速要慢,孔小转速要快。目前大多数钻床的转速在 15 000~80 000r/min 范围内。

## 13.2.1.6 印制电路板的电镀

### 1. 铜箔的表面处理

印制板在孔金属化之前需要对表面进行清洁处理,以提高孔金属化镀层与基体的结合力。同时,在孔金属化后、图形成像前应对铜箔表面进行有效的处理,这对于增强铜与抗蚀层的黏附强度也是非常必要的。若 FPC 板在孔金属化前表面未处理干净,孔化镀层可能出现分层、起泡的现象;图形成像前对铜表面清洁粗化不够,与抗蚀剂的结合不牢,制作精细的线路图形几乎不可能,在后续的电镀工序容易出现渗镀,造成线条边缘不整齐甚至短路,影响图形精度。

图形转移前,对覆铜板表面清洁、粗化的方法主要有以下几种:

#### (1) 磨料刷子清洁

这种方法是通过旋转磨料与板面之间相切运动的作用,机械地刮切和粗化板面,同时也除去了表面的污物。这种方法处理后的板面会形成许多平行的凹痕。凹痕越密越细,板面与抗蚀剂的结合力就越好,但这些凹痕会给基板留下表面有刷痕的隐患。

#### (2) 浮石粉刷板机

浮石粉是来自火山灰的一种复杂的天然硅化合物,它的颗粒大小不一,重量较轻,密度小于  $1\text{g/cm}^3$ 。采用浮石粉和尼龙刷辊进行刷板时,浮石粉对板面的冲击形成了微观上凹凸不平的粗化表面。这种粗化痕迹没方向性,不会形成明显的凹痕,抗蚀剂能够理想地附着在板面上,是比较理想的清洁方法之一。

#### (3) 化学清洗

化学清洗是首先用化学试剂除去表面的有机杂质和无机污染物,然后用微蚀液对表面进行粗

化处理。经过处理后的铜板表面具有良好的粗糙度,而且不存在任何机械划痕或残留的刷料微粒,因而是精细导线加工中理想的清洁、粗化处理方法。但是,这种方法在进行清除铜箔表面污物时一定要进行彻底,必须保证在微蚀前将表面上所有的污物清洗干净,只有这样才能做到微蚀后具有均匀的粗糙表面。

比较上述几种清洁、粗化方法,生产印制板时采用浮石粉尼龙辊刷板或化学清洗是理想的选择,这两种方法既能保证清除表面污物,又能做到板面具有良好的粗糙且无明显的划痕。

印制板的生产,表面清洁处理是至关重要的一道工序。因为它不仅要求表面的状态良好,同时对尺寸稳定性也提出了严格的要求。尺寸稳定性不仅取决于铜箔层压板的尺寸变化率,还与线路图形、生产设备、工艺条件等有关。挠性板的基材薄而软,在机械刷板时,由于刷辊旋转方向和板子的传动方向相反,如果刷辊压力过大,基材将受到很大的张力而被拉长,这是引起尺寸变化的重要原因之一。刷板过程还应避免基材划伤、撕裂或卡板,如果不具备薄板的生产条件,建议采用托板(光滑垫板支撑,双面刷磨),这样能避免由于机器的水平滚轮间距大,板子自身重量和清洗水的压力以及冷、热风的影响造成基材卡板损伤。

## 2. 印制板电镀多种表面涂复工艺流程

印制板在制作过程中,为了达到板面的要求,需选用多种表面涂覆工艺,例如,孔金属化、镀铜、镀镍、镀金、化学镀镍、化学镀金、有机助焊保护膜以及电镀锡基合金等。这些表面涂覆层的质量直接影响到印制板的质量,如外观、可焊性、耐蚀性、耐磨性等性能。

(1) 孔金属化 可以选用化学沉铜工艺,也可以用直接镀铜工艺。孔金属化以后的印制板,表面镀有 $5\sim 8\mu\text{m}$ 的金属铜。

(2) 热风整平或热熔工艺流程 酸性除油→微蚀→活化→镀铜→镀锡铅→去膜→蚀刻→退锡铅→涂阻焊层→热风整平;或者,酸性除油→微蚀→活化→镀铜→镀锡铅→去膜→蚀刻→浸亮→热熔。

(3) 板面镀金工艺流程 酸性除油→微蚀→活化→镀铜→镀镍→镀金→去膜→蚀刻。

(4) 插头镀金工艺流程 酸性除油→微蚀→活化→镀低应力镍→预镀金→镀金。

(5) 有机助焊保护膜工艺流程 酸性除油→微蚀→活化→浸有机助焊保护膜。

(6) 化学镀镍金工艺流程 酸性除油→微蚀→预浸→钯活化剂→后浸→化学镀镍→化学浸金→化学镀厚金。

(7) 去沾污工艺 双层板或多层板在孔金属化之前,去除孔内环氧树脂沾污,以保证孔金属化的质量。其工艺流程:溶胀→去胶渣→中和。

现今,电镀、化学镀、置换镀及镀前、镀后处理技术在电子电镀技术领域十分活跃。

## 3. 印制板电镀技术的新进展

早期,印制电路板的最终表面精饰大都采用热浸锡铅合金焊料的热风整平(HASL)工艺。由于热浸的温度高(约 $250^{\circ}\text{C}$ ),表面安装的零件都必须具备耐高温性能,而且热浸后的焊料虽经热风整平,其表面仍然凹凸不平,不适合于表面贴装(SMT)新工艺的实施,也不能用于铝线键合(Aluminium Wire Bonding)。因此,近年来人们集中精力大力开发可在低温操作,又能获得表面十分平整的即可焊又可键合的新型替代HASL工艺,并取得了明显的效果,正在迅速推广。

目前可成功取代HASL工艺的新技术有下面几种:

(1) 电镀镍/电镀软金 它主要用于金线键合(Gold Wire Bonding),但要求全线路要导通。

(2) 化学镀镍/置换镀金(EN/IG) 也称化学镀镍金。它适于焊接和铝线键合,因全程采用化学镀,线路不必事先导通即可施镀。



(3) 化学镀镍/化学镀钯/置换镀金 (EN/EP/IG) 早期,这样做的目的是用廉价的钯取代金,然而近年来钯的价格远超过金(约 3 倍),因而应用越来越少。

(4) 化学镀镍/置换镀金/化学镀金 它适于焊接以及金线、铝线的键合。

(5) 有机焊接保护剂 (OSP, Organic Solderability Preservative) 它适于 1 至 2 次重熔的焊接,但不能用于键合。

(6) 置换镀锡 (IT) 它是新兴的工艺,镀层十分平整,厚度只有  $1\mu\text{m}$ ,但焊接性能优良,可通过  $155^{\circ}\text{C}$  烘烤 4h 及 3 次重熔,完全可取代 HASL。但不适于键合。

(7) 置换镀银 (IS) 目前,这是最新最好的工艺。镀层十分平整,厚度仅  $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ ,可通过  $155^{\circ}\text{C}$  烘烤 4h 及 3 次重熔,同时适于铝线键合,是一种价廉物美的取代 HASL 及化学镀镍金 (EN/IG) 的新技术。它特别适用于高密度细线和细孔印制板,如 BGA、COB 板。

### 13.2.1.7 印制电路板的质量检验

印制电路板在制成之后,要通过下述质量检验,才能插装、焊接。

#### 1. 目视检验

即用肉眼检验所能见到的某些性能。

- (1) 凹痕 表面厚度降低,凹陷不明显。
- (2) 麻坑 没有完全穿透金属箔出现的一些小孔。
- (3) 划痕 表面轻微的斑痕或划伤。
- (4) 表面粗糙 表面不光滑或不平整,具有隆起点、凸点等。
- (5) 空洞 局部区域没有露出基材。
- (6) 针孔 以完全穿透金属箔的小孔形式出现的一些缺陷。
- (7) 焊盘的重合性 检验孔是否在焊盘中心。
- (8) 导线图形的完整性 测量导线图形的完整性。用照相底图制造的底片覆盖在已加工好的印制板,来测定导线宽度、外形是否处于在要求的范围内。
- (9) 外形尺寸 检验印制板的外边缘尺寸是否处于所要求的范围之内。

#### 2. 连通性

对电路板要进行连通性试验,以查明印制电路图形是否是连通的。这种试验可借助于万用表来进行。

#### 3. 绝缘电阻

试验的目的是测量印制板绝缘部件对外加直流电压所呈现出的一种电阻。

在印制板电路中,此试验可以在同一层、也可以在两个不同层上的各条导线之间来进行。

#### 4. 可焊性

可焊性是用来测量元器件连接到印制板上时,焊接对印制图形的润湿能力。

- (1) 润湿 焊料在导线和焊盘上自由流动及扩展,而成黏附性连接。
- (2) 半润湿 焊料首先润湿表面,然后由于润湿不佳而造成焊接回缩,结果在基底金属上留下一薄层焊料。在表面一些不规则的地方,大部分焊料都形成了焊料球。
- (3) 不润湿 其情况是:虽然表面接触熔融焊料,但在其表面丝毫未沾上焊料。

#### 5. 镀层附着力

一种通用方法是胶带试验法。把胶带横贴于要测的导线上,并将此胶带用手按压,使气泡全部排除,然后掀起胶带的一端,扯掉胶带,拉胶带时应快速猛扯,扯下的胶带完全干净,则说明

试验结果合格。

此外还有抗剥强度、孔端抗拉脱强度、电流击穿、载流量等试验。

## 13.2.2 挠性印制板制造及检测技术

### 13.2.2.1 工艺审查和准备

#### 1. 工艺审查

工艺审查是针对设计所提供的原始资料, 根据有关的设计规范及相关标准, 结合生产实际, 对设计部位所提供的制造印制电路板有关设计资料进行审查。工艺审查的要点有以下几个方面:

(1) 设计资料是否完整(包括软盘、所执行的技术标准等)。

(2) 调出软盘资料, 进行工艺性检查, 其中应包括电路图形、阻焊图形、钻孔图形、数字图形、电测图形及相关的设计资料等。

(3) 对工艺要求是否可行、可制造、可电测、可维护等。

#### 2. 工艺准备

工艺准备, 是根据与设计相关的技术资料进行生产前的准备。工艺, 应按照工艺程序科学地进行编制, 其主要内容应包括以下几个方面:

(1) 所制定的工艺程序, 要合理、准确、易懂、可行。

(2) 在首道工序中, 应注明底片的正、反面、焊接面及元件面, 并且进行编号或标志。

(3) 在钻孔工序中, 应注明孔径类型、孔径大小、孔径数量。

(4) 在进行孔金属化时, 要注明对沉铜层的技术要求及背光检测或测定。

(5) 在图形转移时, 要注明底片的药膜面与光致抗蚀膜的正确接触及曝光条件的测试条件确定后, 再进行曝光。

(6) 曝光后的半成品要放置一定的时间再进行显影。

(7) 图形电镀加厚时, 要严格地对表面露铜部位进行清洁, 并检查镀铜厚度及其他工艺参数, 如电流密度、槽液温度等。

(8) 进行电镀抗蚀金属——锡铅合金时, 要注明镀层厚度。

(9) 蚀刻时要进行首件试验, 条件确定后再进行蚀刻, 蚀刻后必须中和处理。

(10) 在进行层压时, 应注明工艺条件。

(11) 有插头镀金要求的应注明镀层厚度和镀覆部位。

(12) 若要进行热风整平, 要注明工艺参数及镀层退除应注意的事项。

(13) 成型时, 要注明工艺要求和尺寸要求。

(14) 在关键工序中, 要明确检验项目、电测方法和技术要求。

### 13.2.2.2 原图审查、修改与光绘

#### 1. 原图审查和修改

原图, 是指设计者通过电路辅助设计系统(CAD)进行设计并提供给印制板制造厂商的印制电路板图。要达到设计所要求的技术指标, 必须按照印制电路板设计规范对原图的各种图形尺寸与孔径进行工艺审查。

#### (1) 审查的项目

导线宽度与间距; 导线的公差范围; 孔径尺寸及其种类、数量; 焊盘尺寸及焊盘与导线连接

处的状态；导线的走向是否合理；基板的厚度（如多层板还要审查内层基板的厚度等）；设计所提技术的可行性、可制造性、可测试性等。

### （2）修改项目

基准设置是否正确；进行导通孔的公差设置时，应根据生产需要需要增加 0.10mm；应将接地区的铜箔的实心面改成交叉网状；为确保导线精度，将原有导线宽度根据蚀到比增加（对负相图形而言）或缩小（对正相图形而言）；图形的正反面要明确，注明焊接面、元件面；对多层图形要注明层数；有阻抗特性要求的导线应注明；尽量减少不必要的圆角、倒角；为降低成本、提高生产效率，要尽量将相差不大的孔径合并，以减少孔径种类过多；在布线面积允许的情况下，尽量设计较大直径的连接盘，增大钻孔孔径。

### 2. 光绘工艺

原图通过 CAD/CAM 系统制作成为图形转移的底片。该工序是制造印制电路板的关键技术之一，必须严格控制片基的质量，使其成为可靠的光具，才能准确地完成图形转移任务。目前广泛采用的 CAM 系统中有激光光绘机来完成此项作业。

#### （1）审查项目

① 片基的选择：通常选择热膨胀系数较小的 175 $\mu\text{m}$  的厚基 PET（聚对苯二甲酸乙二醇酯）片基。

② 对片基的基本要求：平整、无划伤、无折痕。

③ 底片存放环境条件及使用周期是否恰当。

④ 作业环境条件要求：温度为 20~27℃、相对湿度为 40%~70%；对于精度要求高的底片，作业环境相对湿度为 55%~60%。

#### （2）底片应达到的质量标准

经光绘的底片是否符合原图技术要求；制作的电路图形应准确、无失真；黑白对比度大，即黑白反差大；导线齐整、无变形；经过拼版的较大的底片图形无变形或失真；导线及其他部位的黑度均匀一致；黑的部位无针孔、无缺口、无毛边等缺陷；透明部位无黑点及其他多余物。

### 13.2.2.3 基材的准备

#### 1. 基材的选择

基材的选择就是根据工艺所提供的相关资料，对库存材料进行检查和验收，挑选出符合质量标准及设计要求的基材。为此，要做好下述工作：

（1）基材的牌号、批次要搞清。

（2）基材的厚度要准确无误。

（3）基材的铜箔表面无划伤、压痕或其他多余物。

（4）特别是制作多层板时，内外层的材料厚度（包括半固化片）、铜箔的厚度要搞清。

（5）对所采用的基材要编号。

#### 2. 下料注意事项

（1）基材下料时首先要看工艺文件。

（2）采用拼板时，基材的备料首先要计算准确，使整板损失最小。

（3）下料时要按基材的纤维方向剪切。

（4）下料时要垫纸以免损坏基材表面。

（5）下料的基材要打号。

(6) 在进行多品种生产时, 所需基材的下料, 要有极为明显的标记, 不能混批、混料或混放。

#### 13.2.2.4 数控钻孔

##### 1. 编程

根据 CAD/CAM 系统所提供的设计资料 (包括钻孔图、钻孔底片等), 进行编程。要实现编辑准确无误的目标, 必须做好以下几方面的工作。

(1) 在实际生产中通常采用两种工艺方法 (原则应根据设备性能要求而定) 进行编程: 一是采用设计部门提供的软盘进行自动编程, 但首先要确定原点位置 (特别是在多层板钻孔时); 二是采用钻孔底片或电路图形底片进行手工编程, 但必须将各种类型的孔径进行合并同类项, 确保钻头更换次数尽可能少。

(2) 编程时要特别注意, 将放大部位的孔与实物孔对准位置, 尤其是采用手工编程方法时, 必须将底版固定在机床的平台上并覆平整。

(3) 编程完工后, 必须制作样板并与底片对准, 在透图台上进行检查。

##### 2. 数控钻孔

数控钻孔, 就是根据计算机所提供的数据按照人为规定进行钻孔。在进行钻孔时, 必须严格地按照工艺要求进行。如果采用底片进行编程时, 要对底片孔位置进行标注, 以便于进行核查。

##### (1) 准备作业

① 由于 FPC 板所用的粘接剂柔软, 容易粘刀, 建议钻孔选用 FPC 专用刀具, 或者使用新钻头 (钻孔数少于 1 000 个)。由于覆铜板和覆盖层都较薄, 因而钻孔时可以将多块板重叠一次钻孔 (根据板厚覆铜板可叠 7~10 片, 覆盖层可叠 10~15 片)。

② 按照工艺文件要求, 将冲好定位孔的盖板、基板按顺序放置, 并固定在机床上规定的部位, 再用胶带格四边固定, 以免移动。

③ 按照工艺要求找原点, 以确保所钻孔精度要求, 然后进行自动钻孔。

④ 确定工艺参数, 如转速、进刀量、切削速度等。

##### (2) 检查项目

要确保后续工序的产品质量, 就必须对钻好孔的基板进行检查。检查项目如下:

① 毛刺、测试孔径、孔偏、多孔、孔变形、堵孔、未贯通、断钻头等。

② 孔径种类、孔径数量、孔径大小要进行检查。

③ 根据印制电路板的精度要求, 进行 X-RAY 检查以便观察孔位对准度, 即外层与内层孔 (特别对多层板的钻孔) 是否对准。

④ 采用检孔镜对孔内状态进行抽查。

⑤ 对基板表面进行检查。

⑥ 检查漏钻孔或多钻孔。

对于漏钻孔、未贯通孔或多钻孔、错位孔, 通常在底照光下, 将重氮片覆盖在基板表面上, 检查有焊盘的位置因无孔而不透光, 或无焊盘的位置透光。

#### 13.2.2.5 孔金属化工艺

挠性多层板的孔化前需要去污渍, 常用的去污渍工艺有两种: 一是用碱性高锰酸钾溶液处理, 二是等离子处理。因为丙烯酸粘接剂耐碱性差, 所以碱性高锰酸钾工艺只适用于环氧类粘接剂。

对于挠性板则多采用等离子处理工艺, 不仅能有效去除腻子, 还能对绝缘介质进行凹蚀, 使内层铜形成可靠的三维结构, 增强孔壁镀层的结合力。

孔金属化工艺过程是印制电路板制造中最关键的一个工序。为此, 就必须对基板的铜表面与孔内表面状态进行认真的检查。

#### 1. 检查项目

- (1) 表面状态是否良好。例如, 无划伤、无压痕、无针孔、无油污等。
- (2) 检查孔内表面状态是否保持均匀、呈微粗糙, 无毛刺。
- (3) 沉铜液的化学分析, 确定补加量。
- (4) 将化学沉铜液进行循环处理, 保持溶液的化学成分的均匀性。
- (5) 随时监测溶液内温度, 使其变化保持在工艺要求范围以内。

#### 2. 孔金属化质量控制

- (1) 沉铜液的质量和工艺参数的确定都要控制在规定的范围内并做好记录。
- (2) 孔化前处理溶液的监控及处理质量分析。
- (3) 确保沉铜的高质量, 应建议采用搅拌(振动)加循环过滤的工艺方法。
- (4) 严格监控化学沉铜过程工艺参数(包括 pH 值、温度、时间、溶液主要成分等)。
- (5) 采用背光试验工艺方法检查, 参考透光程度图像(分为 10 级), 来判定沉铜效果和沉铜层质量。

- (6) 经加厚镀铜后, 应按工艺要求作金相剖切试验。

#### 3. 孔金属化

孔金属化工艺, 目前最普遍采用的是沉薄铜工艺方法。如何控制它, 可参考如下几点:

- (1) 最有效的沉铜方法是采用挂兰并倾斜  $30^\circ$  角, 并且基板之间要有一定的距离。
- (2) 要保持溶液的洁净程度, 必须进行过滤。
- (3) 严格控制对沉铜质量有极大影响作用的溶液温度, 最好采用水套式冷却装置系统。
- (4) 经清洗的基板必须立即将孔内的水分用热风吹干。

### 13.2.2.6 图形制作和电镀

#### 1. 图形制作

挠性板的图形转移与普通印制板区别不大, 常用的抗蚀层有液态抗蚀剂和干膜两种。液态抗蚀层涂敷时, 应避免由于静电使灰尘、漂浮物吸附到抗蚀层中; 另外, 选择好抗蚀剂的黏稠度、烘板的时间和温度, 以保证抗蚀剂与铜板的黏结力达到最大, 并保持干燥以防止在图形转移时粘底版, 造成图形不完整或边缘不整齐。

贴干膜时需要特别注意, 覆铜板较软, 应选用薄板贴膜机, 以保证干膜与基材紧密贴合。曝光参数与常规印制板相同, 但由于板子薄、不平整, 吸真空度可能较差, 为此可借助刮刀, 赶走空气, 确保挠性板吸真空良好。光聚合后的干膜比未聚合的干膜挠性差, 操作中应避免板子弯折引起干膜与基材脱落。

显影时建议采用刚性板牵引, 这样能避免显影液的喷淋压力和冷热风的影响导致挠性板弯折或卡板。

#### 2. 镀前准备和电镀处理

图形电镀抗蚀金属——锡铅合金镀层的主要作用是在蚀刻时保护基体铜镀层。但必须严格控制镀层厚度, 以保证在蚀刻过程中能有效地保护基体金属。

### (1) 检查项目

检查孔金属化内壁镀层是否完整、有无空洞、缺金属铜等缺陷；检查露铜的表面加厚镀铜层表面是否均匀、有无结瘤、有无砂粒状等；检查镀液的化学成分是否在工艺规定范围以内；核对镀覆面积计算数值，再加上根据实际生产经验所获得的数值或百分比，最后确定电流数值；检查上道工序所提供的工艺文件，按照工艺要求来确定电镀工艺参数；检查槽的导电部位连接的可靠性及导电部位的表面是否处在完好状态；镀前处理溶液的分析 and 调整工作单；确定装挂部位和夹具的准备就绪与否。

### (2) 镀层质量控制

准确地计算镀覆面积和参考实际生产过程对电流的影响，正确地确定所需电流值，掌握电镀过程电流的变化，确保电镀工艺参数稳定性；在未进行电镀之前，首先采用调试板进行试镀，致使槽液处在激活状态；确定总电流流动方向，再确定挂板的先后秩序，原则上应采用由远到近；确保电流对任何表面分布均匀；确保孔内镀层均匀和镀层厚度一致，除采用搅拌过滤工艺措施外，还需采用冲击电流；经常监控电镀过程中电流的变化，确保电流数值的可靠性和稳定性；检测孔的镀层厚度是否符合技术要求。

### 3. 镀锡铅合金工艺

对于印制电路板来说，给图形电镀锡铅合金镀层也是非常重要的工序之一。所以说它重要，是由于后续的蚀刻工艺对电路图形的准确性将和完整性将起到很重要的作用。为确保锡铅合金镀层的高质量，必须做好以下几个方面的工作：

(1) 严格控制溶液成分，特别是添加剂的含量和锡铅比例。

(2) 除了通过机械搅拌使溶液保持均衡之外，下槽后还必须采用人工摆动以使孔内的气泡尽快冒出，以确保孔内镀层均匀。

(3) 采用冲击电流使孔内很快地镀上一层锡铅合金层，再恢复到正常所需要的电流。

(4) 镀到 5min 时，需取出来观察孔内镀层状态。

(5) 单槽作业时需按输入总电流的相反方向挂板。

#### 13.2.2.7 锡铅合金镀层的退除

制作挠性板对蚀刻机的要求较高，蚀刻前首先要清洗蚀刻机，将传动辊上的结晶清除干净以避免残渣结晶划伤图形，清洗喷嘴保证喷淋腐蚀均匀一致。为掌握好喷淋时间，首先要做好喷淋时间与蚀刻速度的曲线图，然后根据所需要的蚀刻量选择喷淋时间。一般情况下，腐蚀时板子边缘的铜会先蚀刻掉，局部不干净可采取点喷方式解决，操作时要避免线条过蚀或欠蚀，否则导线边缘整齐性差。腐蚀后的基板更软，所以建议采用硬板牵引防止卡板、折板。

如采用热风整平工艺，就必须将抗蚀金属层退除，才能获得高质量的锡铅合金层。挠性板的去膜过程要严格控制，聚酰亚胺耐碱性较差，丙烯酸胶耐碱性更差，所以采用强碱溶液去膜时要严格掌握去膜液的温度、浓度和去膜时间，去膜后立即用清水洗净板面和孔内的残留液。

#### 1. 检查项目

(1) 检查膜层退除是否干净，特别是金属化孔内是否有残留的膜，若有必须清理干净。

(2) 检查表面与孔内壁金属应呈现金属光泽，无黑斑点、残留锡铅层等缺陷。

(3) 退除锡铅合金镀层前，必须将表面产生的黑膜除去，使之呈现金属光泽。

#### 2. 退除质量的控制

(1) 严格按照工艺规定的工艺参数实施监控。

(2) 经常观察锡铅合金镀层的退除情况。

(3) 根据基板的几何尺寸, 严格控制浸入和提出时间。

(4) 基板铜表面与孔内铜表面锡铅合金镀层经退除后, 必须使用温水彻底进行清洗, 以避免发生翘曲变形。

(5) 加工过程中必须认真进行检查。

### 3. 退除工艺

对采用热风整平工艺的半成品而言, 退除锡铅合金镀层的质量优劣将决定热风整平的质量的高低。所以, 要严格按照工艺规定进行加工。为确保退除质量, 请务必做好以下几个方面的工作。

(1) 按照工艺规定调配退除液, 并进行分析。

(2) 为确保安全作业, 必须采用水套加温, 特别大批量退除时, 要确保温度的一致性和稳定性。

(3) 退除过程会大量消耗溶液内的化学成分, 必须按照一定的数量随时进行补充。

(4) 在抽风的部位进行退除处理。

(5) 经退除干净的基板必须认真进行检查。

## 13.2.2.8 热风整平工艺

### 1. 工艺准备和处理

热风整平工艺的主要作用是使印制电路板的表面焊盘与孔内浸入所需焊料, 为电装提供可靠的焊接性能。

(1) 检查项目 检查阻焊膜质量, 确保孔内与表面焊盘无多余的残留阻焊膜; 检查所有插头镀金部位与阻焊膜是否露有金属铜, 为保证无接缝, 阻焊膜应掩盖镀金处很小部分; 确定热风整平工艺参数并进行调整; 检查处理溶液的配比是否符合工艺标准, 成分不足时应立即进行分析调整; 检查焊锅焊料成分是否符合 60/40 (锡/铅比例), 并分析含铜杂质质量; 检查助焊剂的酸度是否在工艺规定的范围以内。

(2) 热风整平焊料层的质量控制 严格控制热风整平工艺参数, 确保工艺参数在整个处理过程中的稳定性; 清理表面氧化残渣; 根据印制电路板的几何尺寸, 设定浸入和提出时间; 在涂覆助焊剂时, 整个基板表面的涂覆要均匀一致, 不能有漏涂现象; 在施工过程中要时刻观察热风整平表面与孔内壁焊料层的质量; 完工的基板要进行自然冷却, 决不能采取急骤冷却的办法, 以防基板翘曲。

### 2. 热风整平工艺

热风整平工艺是确保电装质量的基础。为此在施工中, 需做好以下几个方面的工作:

(1) 在热风整平前, 要确保表面与孔内干净, 并保证孔内无水分。

(2) 涂覆助焊剂时, 要确保助焊剂涂覆均匀, 不能有未涂覆部分, 特别是孔内。

(3) 装置夹具的部位, 如是气动夹就必须保持垂直状态; 如采用挂吊就必须选择在基板的中心位置。

(4) 基板要绝对保持在装挂的位置, 决不能摆动或漂移。

(5) 经过热风整平的基板必须保持自然冷却, 避免急骤冷却。

## 13.2.2.9 加厚镀铜及外形加工

### 1. 镀前准备和电镀处理

加厚镀铜的主要作用是保证孔内有足够厚的铜镀层, 确保电阻值在工艺要求的范围以内, 并

使其作为插装件的固定位置以确保连接强度；有些孔只作为导通孔，起到两面导电的作用，为表面封装器件提供基础。

### （1）检查项目

主要检查孔金属化质量状况，应保证孔内无多余物、毛刺、黑孔、孔洞等；检查基板表面是否有污物及其他多余物；检查基板的编号、图号、工艺文件及工艺说明；搞清装挂部位、装挂要求及镀槽所能承受的镀覆面积；镀覆面积、工艺参数要明确，保证电镀工艺参数的稳定性和可行性；导电部位进行清理和准备，再先通电处理使溶液呈现激活状态；槽液成分是否合格、极板表面状态良好；如采用栏装球形阳极，还必须检查消耗情况；检查接触部位的牢固情况及电压、电流的波动范围。

### （2）加厚镀铜质量的控制

① 准确地计算镀覆面积和分析实际生产过程对电流的影响，正确地确定所需电流数值，掌握电镀过程电流的变化，确保电镀工艺参数稳定。

② 在未进行电镀前，首先采用调试板进行试镀，致使槽液处在激活状态。

③ 确定总电流的流动方向，再确定挂板的先后次序，原则上应采用由远到近；确保电流对任一镀件表面呈均匀分布。

④ 确保孔内镀层的均匀性和镀层厚度的一致性，除采用搅拌过滤的工艺措施外，还需采用冲击电流。

⑤ 经常监控电镀过程中电流的变化，确保电流数值的可靠性和稳定性。

⑥ 检测孔镀铜层厚度是否符合技术要求。

### 2. 镀铜工艺

在加厚镀铜工艺过程中，必须经常对工艺参数进行监控。要做好加厚镀铜工序，就必须做到如下几点：

（1）根据计算机计算的面积数值，结合生产实际积累的经验常数，对电镀参数进行调整。

（2）根据计算的电流数值，为确保孔内镀层的完整性，就必须在原有电流值上增大一定的数值，即冲击电流，然后在短时间内回恢原有数值。

（3）电镀达 5min 时，取出基板观察表面与孔内壁的铜层是否完整，全部孔内呈金属光泽为佳。

（4）基板与基板之间必须保持一定的距离。

（5）当加厚镀铜达到所需要的电镀时间，在取出基板期间，仍要保持一定的电流，确保后续基板表面与孔内不会产生发黑或发暗。

### 3. 外形加工

挠性印制板的外形加工，批量大时宜采用专用冲模冲；批量小时可用剪刀剪。手工剪外形精度较差，但成本低，适合品种多样数量少的产品。在外形加工过程中，必须做好以下几个方面的工作。

（1）严格按照工艺规定，进行批量生产前，首先进行试加工，即首件检验制。这样做的目的是以防造成产品超差或报废。

（2）根据印制板精度要求，可采用单块或多块垒层加工。

（3）在机械加工前，必须精确地找好基准面，经核对无误后再进行铣加工。

（4）加工时要特别注意保证基板表面的质量。



## 第 14 章 印制电路板组装焊接技术

### 14.1 电子组装工艺技术概述

电子设备的使用功能及质量好坏，直接影响着人们的生活与工作，影响看重大科研项目、乃至军事、航天试验工程的成败。因此，生产出高性能、高质量的电子设备已成为生产厂家追求的目标。电子设备组装的目的，就是以较合理的结构安排、最简化的工艺，实现整机的技术指标，快速有效地制造出稳定可靠的产品。电子设备整机中最主要的是阻容组件、变压器、线圈、大的晶体管及带散热器的晶体管组件、电源模块、微波组件（或模块）、母板型机箱底座的连线、各种印制电路板插座、焊/压接电缆座的连线等电子元器件、零部件。怎样将这些组件按图纸要求进行组装连接，以满足各项设计电气性能指标获得最佳实现，这就是电子装联工艺的任务。它是将线路图纸实现创造性表达的一种专门工艺技术。

#### 14.1.1 电子组装的内容和方法

##### 14.1.1.1 组装内容和组装组别

电子设备的组装是将各种电子元器件、机电元件及结构件，按照设计要求，装接在规定的位上，组成具有一定功能的完整的电子设备的过程。组装内容主要有：单元的划分；元器件的布局；各种元器件、部件、结构件的安装；整机联装等。在组装过程中，根据组装单位的大小、尺寸、复杂程度和特点的不同，将电子设备的组装分成不同的等级，称为电子设备的组装级。组装级可分为：

（1）第一级组装 一般称为元件级。是最低的组装级别，其特点是结构不可分割。通常指通用电路元件，分立元件及其按需要构成的组件，集成电路组件等。

（2）第二级组装 一般称插件级。用于组装和互连第一级元器件，例如，装有元器件的印制电路板或插件等。

（3）第三级组装 一般称为底板级或插箱级。用于安装和互连第二级组装的插件或印制电路板部件。

（4）第四级组装及更高级别的组装 一般称箱、柜级及系统级。它主要通过电缆及连接器互连第二、三级组装，并以电源馈电构成独立的有一定功能的仪器或设备。对于系统级，可能设备不在同一地点，则须用传输线或其他方式连接。图 14-1 为电子设备组装级的示意图。

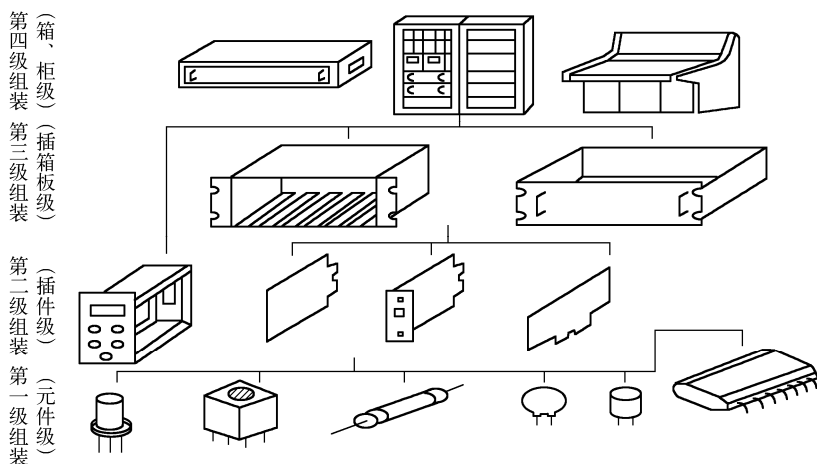


图 14-1 电子设备组装级的示意图

#### 14.1.1.2 组装特点及方法

### 1. 组装特点

电子设备的组装，在电气上是以印制电路板为支撑主体的电子元器件的电路连接，在结构上是通过紧固零件或其他方法，由内到外按一定顺序进行安装。电子设备属于技术密集型产品，组装电子设备的主要特点如下：

(1) 组装工作是由多种基本技术构成的。如元器件的筛选与引线成形技术、线材加工处理技术、焊接技术、安装技术、质量检验技术等。

(2) 装配操作质量, 在很多情况下, 都难以进行定量分析。如焊接质量的好坏, 通常以目测判断; 刻度盘、旋钮等的装配质量多以手感鉴定等。因此, 掌握正确的安装操作方法是十分必要的, 切勿养成随心所欲的操作习惯。

(3) 实施装配工作的人员必须进行训练和挑选, 不可随便上岗。不然的话, 由于知识缺乏和技术水平不高, 就可能生产出次品, 一旦混进次品, 就不可能百分之百地被检查出来, 产品质量就没有保证。

## 2. 组装方法

组装在生产过程中要占去大量时间,因为对于给定的应用和生产条件,必须研究几种可能的方案,并选取其中的最佳方案。目前,电子设备的组装方法,从组装原理上可以分为:

(1) 功能法 这种方法是将电子设备的一部分放在一个完整的结构部件内,能得到在功能和结构上都属完整的部件,从而便于生产和维护,用一个部件或一个组件来完成设备的一组既定功能,分别称这种方法为部件功能法或组件功能法。不同的功能部件(接收机、发射机、存储器、译码器、显示器)有不同的结构外形、体积、安装尺寸和连接尺寸,很难做出统一的规定,这种方法将降低整个设备的组装密度。此法广泛用在采用电真空器件的设备上,也适用以分立元件为主的产品或终端功能部件。

(2) 组件法 这种方法是为统一电气安装工作和提高安装密度而建立起来的。它是制造出一些在外形尺寸和安装尺寸上都统一的部件,这时部件的功能完整性退居到次要地位。根据实际需要此法又可分为平面组件法和分层组件法。此法大多用于组装以集成器件为主的设备。规范化所带来的副作用是允许功能和结构有某些余量(因为元件的尺寸减小了)。

(3) 功能组件法 这种方法是兼顾功能法和组件法的特点，制造出既体现功能完整性又体现结构尺寸规范化的组件。微型电路的发展，导致组装密度进一步增大，以及可能有更大的结构余量和功能余量。因此，对微型电路进行结构设计时，要同时遵循功能原理和组件原理。

14.1.1.3 电子设备组装的工艺流程

电子设备装配的工序因设备的种类、规模不同，其构成也有所不同。但基本工序都大致相同。一般装配工艺流程如图 14-2 所示。

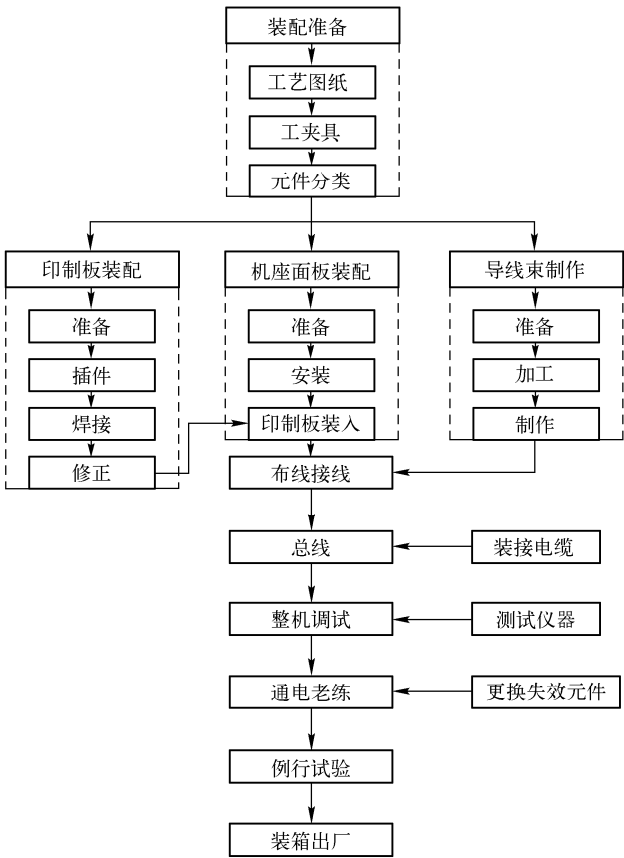


图 14-2 一般装配工艺流程

由于产品的复杂程度、设备场地条件、生产数量、技术力量及工人操作技术水平等情况的不同，生产的组织形式和工序也要根据实际情况有所变化。例如，样机生产可按图示主要工序直列进行。若大批量生产，机座装配及线束加工等几个工序可并列进行。重要的是要根据生产人数、装配人员的技术水平来编制最有利于现场指导的工序。

14.1.2 电子组装工艺技术的发展

14.1.2.1 电子组装工艺技术的发展和特点

1. 电子组装工艺技术的发展

电子组装工艺技术的发展与电子元器件、材料的发展密切相关，每当有一种新型电子元器件出现并获得应用，都必然令促使电子组装工艺技术有新的进展。其发展大致可分为五个阶段，见表 14-1。

表 14-1 电子组装工艺技术的发展

项目 内容 过程	元 器 件	布 线	焊 接 材 料	连 接 工 艺	测 试
第一阶段	电子管、大型元 器件	电线、电缆手工布 线	锡铅焊料、松香 焊剂	电烙铁手工焊 接，手工连接	通用仪 器 仪 表，人工测试
第二阶段	半导体二、三极 管、小型和大型元 件	单双面印制电路板 布线	锡铅焊料、活性 松香焊剂	手工插装，半自 动插装，手工焊接， 浸焊	通用仪 器 仪 表，人工测试
第三阶段	中、小规模集成 电路，半导体二、 三极管，小型元件	双面和多层印制电 路板布线	锡铅焊料、膏状 焊料、活性焊剂	自动插装、波峰 焊和再流焊	数字式仪表， 在线测试仪自动 测试
第四阶段	大 规 模 集 成 电 路，表面安装元件	高密度印制电路 板，挠性印制电路板 布线	膏状焊料	机械手插装和自 动贴装，再流焊	智能式仪表， 在线测试和计算 机辅助测试
第五阶段	超大规模集成电 路，复合表面安装 元件	高密度印制电路板 布线，元器件和基板 一体化	膏状焊接	再流焊、微电子 焊接	计算机辅助测 试

2. 电子组装工艺技术发展的特点

(1) 连接工艺的多样化

电子设备在生产制造中有许多装联方法，实现电气连接的工艺主要是焊接（手工和机器焊接）。除焊接外，压接、绕接、胶接等连接工艺也越来越受到重视。其中，胶接主要用于非电气接点的连接，如金属或非金属的黏接，采用导电胶也可实现电气连接。

(2) 工装设备的改进

电子设备的小型化，大大促进了组装工具和设备的不断改进，采用小巧、精密和专用的工具和设备，使组装质量有了可靠的保证。例如，手动、电动、气动成形机，集成电路引线成形模具等，可提高成形质量和效率。进行导线端头处理时，采用专用剥线钳或自动剥线、捻线机，可克服伤线和断线等缺陷。机械装配工具逐步淘汰了传统的钳工工具，向结构小巧、钳口精细和手感舒适的方向发展。电动或气动工具在成批生产的流水线上已得到广泛应用。

(3) 检测技术的自动化

电子设备组装质量的检查和电气性能的测试，正在向自动化方向发展。例如，焊接质量的检测，用可焊性测试仪，预先测定引线可焊性水平，达到要求的元器件才能安装焊接。

检查电气连接是否正确，用人工检查的方法不仅效率低，而且容易出现错检或漏检，特别是装配密度高、元器件小型化的印制电路板组装件，人工检查越来越困难，而采用计算机控制的在线测试仪，可以根据预先设置的程序，快速正确地判断连接的正确性和装联后元器件参数的变化。

对于整机性能的测试，利用通用测试仪器进行测试，速度慢、精度低，现在已逐步采用计算机辅助测试（CAT）来进行整机测试；测试用的仪器仪表已大量使用高精度、数字化、智能化产品，使测试精度和速度大大提高。

(4) 新工艺新技术的应用

为提高产品质量，在组装过程中，新工艺、新技术、新材料正不断地被采用。例如，焊接材料采用活性氢化松香焊锡丝代替传统使用的普通松香焊锡丝。表面防护处理采用喷涂 501-3 聚酯绝缘清漆及其他绝缘清漆工艺，提高了产品防潮、防盐雾、防霉菌等能力。新型连接导线，如氟塑料绝缘导线、镀膜导线在产品中得到越来越多的应用，对提高连接可靠性、减轻重量和缩小体积起到一定作用。

随着电子设备日益微、小型化和环保的要求，使电子组装和封装工艺技术面临新的挑战。欧盟 WEEE 和 ROHS 两个电子法规的发布和限期实施的要求，加速了电子设备无铅化的进程。最早应用于混合电路中的片状元件和表面组装工艺技术（SMT）早已广泛用于板级电子设备的

组装中, SMT 已成为主流的组装工艺。

电子设备的研发和生产走出了早期小而全的模式, 形成了结构更趋合理、分工更为明确的产业结构: 产品设计、电路板组装和产品总装测试。电路板组装的工作更多的由专业 SMT 厂来完成。

#### 14.1.2.2 无铅焊接的现状和发展

铅是一种有毒物质, 一旦被人体吸收, 将损坏健康。铅在电子设备中主要用于与锡组成铅锡合金作为焊料。传统的电子设备在焊接组装时, 无一不是用铅锡合金做焊料的。但在其他环节也会用到铅, 如贴片用锡膏、元器件在出厂前引线浸锡、PCB 上的油墨、压电陶瓷材料等。因为以上原因, 结合目前人类越来越重视环保和健康, 无铅焊接组装电子设备的课题理所当然地被提出来了。

2003 年 2 月 13 日, 欧盟 WEEE 和 ROHS 指令正式生效, 规定自 2006 年 7 月 1 日起在欧洲市场上销售的电子设备必须是无铅产品。同时各成员国必须在 2004 年 8 月 13 日之前完成相应的立法工作。

日本是对无铅焊研究和生产较早的国家, 松下公司 1999 年 10 月推出第一款无铅组装电子设备。1999 年 10 月, NEC 公司推出无铅组装笔记本电脑。2000 年 3 月, 索尼公司推出无铅组装摄像机。

1999 年 7 月 29 日, 美国环境保护署修改有害化学物质排出的报告义务基准值, 对于铅及其化合物类有害物质, 基准值由原来的 10 000 磅减少至 10 磅。2000 年 1 月, 美国 NEMI 正式向工业界推荐标准化无铅焊料。

2003 年 3 月, 中国信息产业部经济运行司拟定《电子信息产品生产污染防治管理办法》, 规定电子信息产品制造者应保证, 自 2003 年 7 月 1 日起实行有毒有害物质的减量化生产措施; 自 2006 年 7 月 1 日起投放市场的国家重点监管目录内的电子信息产品不能含有铅、镉、汞、六价铬、聚合溴化联苯或聚合溴化联苯乙醚等。

无铅化组装已成为电子组装产业的不可逆转的趋势。

##### 1. 无铅焊接的技术难点

无铅化电子组装主要指无铅化焊接, 包括波峰焊和回流焊。需要解决的技术问题是焊料和焊接两个基本问题。

##### (1) 焊料

目前, 电子行业使用的焊料通常是 63% 的锡和 37% 的铅组成的, 这种合金焊料共晶熔点低, 只有 183℃; 铅能降低焊料的表面张力, 便于润湿焊接面; 成本低。

无铅焊料是由哪些成分组成的呢? 目前, 国际上尚没有无铅焊料的统一标准。通常是以锡为基体, 添加少量的铜、银、铋、锌或铟等组成。例如, 美国推荐的锡、4% 银、0.5% 铜的焊料; 日本推荐的锡、3.2% 银、0.6% 铜的焊料。应该指出, 这些焊料中并不是一点铅都没有, 通常规定其含量小于 0.1%。

使用无铅焊料带来的问题: 熔点高 (260℃ 以上), 润湿差, 成本高。

##### (2) 焊接

由于焊料的成分和性能发生了变化, 焊接过程中也出现了新的问题:

- ① 由于成分不同而出现焊料的熔点及性能不同, 焊接温度和控制变得比铅锡焊料复杂。
- ② 熔点的提高对设备和被焊接的元器件的耐热要求随之提高, 对波峰焊材料、回流焊温区设置提出了新的要求。对被焊接的元器件如 LED、塑料件、PCB 板提出了新的耐高温问题。
- ③ 由于无铅焊润湿性差, 要求采用新的助焊剂和新的焊接设备, 才能达到较好的焊接效果。
- ④ 由于新焊料的成本较高, 须设法减少焊料损耗, 采用充氮工艺等。

##### 2. 国内无铅焊电子组装的发展状况

国内焊接设备制造商日东公司、劲拓公司、科隆威公司等几乎所有的大中型公司, 均在研制

无铅波峰焊设备，目前已形成一定的规模和水平。但从考察情况分析，国内生产的无铅焊设备还是以出口和供应国内的外资企业为主，内资企业包括一些大型企业，有的处于观望状态，有的在试点，有的在少量生产出口产品。之所以推进缓慢，主要是迫于成本压力。例如，一台普通波峰焊机售价 7 万元左右，而一台无铅波峰焊机售价 18 万~28 万元，是普通焊机的 3~4 倍；63 度铅锡焊料售价每公斤 50 元，无铅焊料的售价将近翻倍。又由于无铅电子设备还需元器件、原材料等其他方面条件的配合，也就更增加了这一项目推进的难度。但是，困难虽有，方向却是一定的，电子制造厂商们必须克服困难，实现这一跨越。

## 14.2 电子焊接工艺技术基础

焊接是电子设备装配过程中一种主要的连接方法，是一项重要的基础工艺技术，也是一种基本的操作技能。在电子设备制造过程中的每个阶段，都要考虑和处理与焊接有关的问题。它涉及物理学和化学中的热传导、扩散、溶解、润湿、氧化和还原等方面的知识；涉及金属学方面的合金理论；涉及材料力学的抗拉强度及应力集中的内容；涉及电学的导电性和绝缘性的知识等。在这里，我们要解决的不是深入探讨焊接技术的理论问题，而是焊接技术在电子设备制造中的应用问题。具体地说，在了解焊接工艺技术基础知识的基础上，着重讨论电子设备的焊接工艺问题，以提高电子设备的焊接质量。

利用加热、加压或其他手段，在两种接触面，依靠原子或分子的相互扩散作用，形成一种新的牢固的结合，使这两种金属永久地连接在一起，这个过程就称为焊接。利用焊接方法进行连接而形成的接点，称为焊点。

焊接通常分为熔焊、钎焊及接触焊三类。

熔焊，是靠加热被焊件（母材），使之熔化产生合金而焊接在一起的焊接技术，如气焊、电弧焊等。

用加热熔化成液态的金属（焊料），把固体金属（母材）连接在一起的方法，称为钎焊。作为焊料的金属材料，其熔点要低于被焊接的金属材料。按照焊料的熔点不同，钎焊又分为硬焊（焊料熔点高于 450℃）和软焊（焊料熔点低于 450℃）。在电子设备装配中的焊接主要采用软焊。

接触焊，是一种不用焊料与焊剂即可获得可靠连接的焊接技术。如点焊等。

### 14.2.1 用于焊接的材料

焊接材料包括焊料和焊剂（又叫助焊剂）。掌握焊料和焊剂的性质、成分、作用原理及选用知识，是电子组装工艺技术中的重要内容之一，对于保证产品的焊接质量具有决定性的影响。

#### 14.2.1.1 普通焊料

传统的焊料填满金属连接处的间隙，在两个金属表面形成合金，使焊料与被连接的金属形成一体。按其组成成分，焊料又分为锡铅焊料、银焊料及铜焊料等。按其熔点，又可分为软焊料（熔点在 450℃ 以下）和硬焊料（熔点在 450℃ 以上）。

在电子设备生产中，使用的焊料绝大多数是锡铅焊料，俗称焊锡。焊料中的主要成分是锡和铅，此外，还含有一定量的熔点比较低的其他金属，如锌、铋、铜、钎、铁、镍等，它们在不同程度上影响着焊料的性能。

##### 1. 对焊料的要求

为保证焊接质量，对焊料的要求如下：

(1) 熔点低 电子设备在焊接时的实际温度比焊料的熔点还要高,例如,焊料熔点在 $183\sim 190^{\circ}\text{C}$ 之间,则实际焊接温度要提高到 $230\sim 250^{\circ}\text{C}$ 范围。焊接温度高,会影响电子元器件的寿命,对操作人员的工作环境也不利,因此要求焊料的熔点要低,以使焊接能在较低温度下进行。

(2) 凝固快 在焊接的冷却阶段,焊点上的熔融焊料将迅速固化。虽然固化是个快速现象,但它的持续时间仍不能忽视。固化期间液态和固态焊料同时并存,焊料的流动性因温度下降而迅速降低,此时任何运动都会引起裂纹,一旦有了裂纹,就不会再有焊料来填充,就可能造成一个不可靠的接点。因此要求冷却时间要短,以有利焊点的成型,同时也便于焊接操作。

(3) 有良好的浸润作用 在焊接期间,熔融焊料的表面张力要求流动性小,有利于焊料的均匀分布,并为润湿创造条件,以保证焊接质量。

(4) 抗蚀性要强 电子设备,特别是国防所需的设备(如雷达、通信设备等),应能在高温、低温、潮湿和盐雾等恶劣环境条件下工作。因此,所用焊料必须有很好的抗蚀性,才能保证设备可靠地工作。

(5) 能够保证焊点的基本要求 即焊料要有良好的导电性和足够的机械强度。

(6) 价格便宜 材料来源丰富,有利于电子设备成本的降低。

## 2. 锡焊料的应用特点

锡(Sn)是一种质软低熔点的金属,熔点为 $232^{\circ}\text{C}$ ;纯锡较贵,质脆而机械性能差;在常温下,锡的抗氧化性强。高于 $13.2^{\circ}\text{C}$ 时,锡呈银白色;低于 $13.2^{\circ}\text{C}$ 时,锡呈灰色;低于 $-40^{\circ}\text{C}$ 时,锡变成粉末。锡容易同多数金属形成金属化合物。

(1) 焊料熔点低,适用范围广 锡焊是软焊,熔化温度在 $180\sim 320^{\circ}\text{C}$ 之间,除对含有大量铬和铝的合金材料不易焊接外,其他金属材料如金、银、铜、铁等都具有良好的可焊性,因而适用范围很广。

(2) 焊接方法简便,易于形成焊点 锡焊焊点是靠融熔的液态焊料的浸润作用而形成的,因而对加热量和焊料都不必有精确的要求就能形成焊点;如用手工焊接,主要工具是电烙铁,使用方便,焊点大小允许有一定的自由度,可以一次形成焊点。

(3) 成本低廉,操作方便 锡焊比其他焊接方法成本低,焊料也比较便宜。焊接工具简单,操作方便,并且整修焊点、拆换元器件以及重新焊接都很方便。

(4) 容易实现焊接自动化 便于生产流水配置,实现焊接自动化。

上述特点,使锡焊成了一种廉价的、可靠的、高效的连接方法。当前,虽然焊接技术发展很快,但由于锡焊具有很强的实用性,在电子设备装配中仍占有连接技术的主导地位。

## 3. 铅锡合金

铅是质地柔软的蓝灰色金属,熔点为 $327.4^{\circ}\text{C}$ ,沸点为 $1725^{\circ}\text{C}$ ,密度 $11.34\text{g}/\text{cm}^3$ 。铅的导电、导热性能差,机械性能也很差。但塑性优异,铸造性好,有较高的抗氧化性和抗腐蚀性,并具润滑性。铅对人体有害,铅本身不会被人体吸收,但它是可溶性化合物。如氯化铅、硝酸铅、醋酸铅等毒性很大。

电子焊接中常用的焊料是锡铅合金。铅与锡以不同比例熔合成铅锡合金以后,熔点和其他物理性能都会发生变化。铅锡焊料具有一系列铅和锡所不具备的优点:

(1) 熔点低,低于铅和锡的熔点,有利于焊接。

(2) 机械强度高,合金的各种机械强度均优于纯锡和铅。

(3) 表面张力小、黏度下降,增大了液态流动性,有利于在焊接时形成可靠接头。

(4) 抗氧化性好,铅的抗氧化优点在合金中继续保持,使焊料在熔化时减少氧化量。

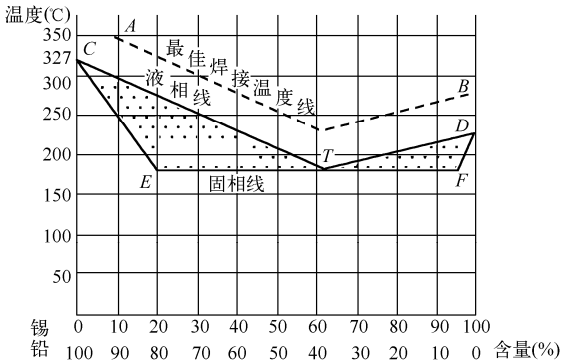


图 14-3 铅锡合金状态图

图 14-3 所示为不同比例的铅和锡的合金状态随温度变化的曲线。从图中可以看出，当铅与锡以不同的比例组成合金时，合金的熔点和凝固点也各不相同。除了纯铅在 330℃（图中 C 点）左右、纯锡在 230℃（图中 D 点）左右的熔化点和凝固点是一个点以外，只有 T 点所示比例的合金是在一个温度下熔化。其他比例的合金都在一个区域内处于半熔化、半凝固的状态。

在图 14-3 中，C-T-D 线叫做液相线，温度高于这条线时，合金为液相；C-E-T-F-D 叫做固相线，温度低于这条线时，合金为固相；在两条线之间的两个三角形区域内，合金是半熔融、半凝固状态。例如，铅、锡各占 50% 的合金，熔点是 212℃，凝固点是 182℃，在 182~212℃ 之间，合金为半熔化、半凝固的状态。因为在这种比例的合金中锡的含量少，所以成本较低，一般的焊接可以使用；但又由于它的熔点较高而凝固点较低，所以不宜用来焊接电子设备。图中 A-B 线表示最适合焊接的温度，它高于液相线约 50℃。

4. 共晶焊锡

图 14-3 中的 T 点叫做共晶点，对应合金成分为 Pb-38.1%、Sn-61.9% 的铅锡合金称为共晶焊锡，它的熔点最低，只有 182℃，是铅锡焊料中性能最好的一种。它具有以下优点：

- （1）低熔点，降低了焊接时的加热温度，可以防止元器件损坏。熔点和凝固点一致，可使焊点快速凝固，几乎不经过半凝固状态，不会因为半熔化状态时间间隔长而造成焊点结晶疏松、强度降低。这一点，对于自动焊接有着特别重要的意义。因为在自动焊接设备的传输系统中，不可避免地存在振动。
- （2）流动性好，表面张力小，润湿性好，有利于提高焊点质量。
- （3）机械强度高，导电性好。

由于上述优点，共晶焊锡在电子设备生产中获得了广泛的应用。

在实际应用中，铅和锡的比例不可能也不必要严格控制在共晶焊料的理论比例上，一般把 Sn-60%、Pb-40% 左右的焊料就称为共晶焊锡，其熔化点和凝固点也不是在单一的 183℃ 上，而是在某个小范围内。从工程的角度分析，这是经济的。

5. 含锡量的影响

表 14-2 列出了不同成分的铅锡焊料的物理性能。由表中可以看出，含锡 60% 的焊料，抗张强度和抗剪切强度都比较好，而含锡量过高或过低都不理想。

焊料在使用过程中出现的偏析现象要引起重视，因为焊接时只有焊料中的锡参加反应，这样随着生产的不断进行，焊料槽中锡的含量会逐渐下降，破坏了共晶焊料的成分，这种现象就是偏析。为了克服焊料的偏析现象，可以定期加入一定量的纯锡。

6. 焊料中的杂质及其影响

锡铅焊料中除主要成分锡和铅外，还含有其他一些微量金属，这些金属称为杂质。它们之中

表 14-2 不同比例铅锡合金的物理性能和机械性能

锡	铅	导电性（铜：100%）	抗张强度（kgf/mm <sup>2</sup> ）	剪切强度（kgf/mm <sup>2</sup> ）
100	0	13.9	1.49	2.0
95	5	13.6	3.14	3.1
60	40	11.6	5.36	3.5
50	50	10.7	4.73	3.1
42	58	10.2	4.41	3.1
35	65	9.7	4.57	3.6
30	70	9.3	4.73	3.5
0	100	7.9	1.42	1.4



有些是生产过程中就存在的，有些则是由于某种需要由制造厂家或使用单位掺入的。

添加很少量的 Ag（银），会增加焊料漫流性和机械强度，使光泽变好，并使熔点发生变化，一般添加量为 0.5%~2%。最有价值的是 Sn62/Pb36/Ag2 所组成的三元合金体系，其熔点为 149℃，熔点低且范围窄，现已大量用于 SMT 焊接工艺中。渗入镉可使焊锡变成高温焊锡。添加 Bi（铋）使熔点降低，Sn43/Pb43/Bi14 的熔融温度为 144℃，可提高耐寒性，但会使焊料变脆。

焊接与生产时，焊料中会带入一些杂质，需要注意和控制这些杂质带来的有害作用，表 14-3 列出了焊料中主要杂质的来源、允许的极限值及对焊接的影响。

表 14-3 焊料中主要杂质的来源、允许的极限值及对焊接的影响

元 素	允许极限值（W%）	杂 质 来 源	影响焊接效果
Zn（锌）	0.02	被焊材料（黄铜）	焊接表面易酸化、发白、降低漫流性和润湿性，引起桥接和挂锡
Cu（铜）	0.08	被焊材料（黄铜）	熔点升高，Cu 为 2%时产生不溶性化合物，引起桥接和挂锡
Fe（铁）	0.02	焊槽材料	熔点升高，润湿性下降，在焊接温度下，铁很难溶于焊料中，如在焊料中掺入 Fe 为 0.1%时，则使焊料变粗糙产生 FeSn、FeSn <sub>2</sub> 等
Ni（镍）	0.08	焊槽材料	熔点升高，变脆，不易溶于焊料，会形成化合物
As（砷）	0.1	焊料	W(As)超过 0.2%时，漫流面积下降 25%，焊料表面变黑
Al（铝）	0.005	焊料	只要在焊料中溶入 Al 为 0.005，焊料就会失去光泽，流动性变差

不同标准的焊锡规定了杂质的含量。不合格的焊锡可能是成分不准确，也可能是杂质含量超标。在生产中大量使用的焊锡应该经过质量认证。焊料中的杂质含量，英、美等国规定不超过 0.5%，我国规定不超过 0.8%。在实际生产中，焊料槽中的焊料必须定期进行分析，一般每月化验一次，如果杂质超过含量必须对焊料进行还原处理，合格后才能使用。

为了使焊锡获得某些性能，也可以掺入某些金属。例如，掺入少量（0.5%~2%）的银，可使焊锡熔点降低，强度增高。

7. 常用焊锡

表 14-4 是一般铅锡焊料的成分及用途。在电子设备的生产中，常使用表中的几种焊锡。

表 14-4 一般铅锡焊料的成分及用途

名 称	牌 号	主要成分（%）			杂 质	熔点（℃）	抗拉强度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	用途及焊接对象
		锡	锑	铅				
10 锡铅焊料	HLSnPb10	89~91	≤0.14	余量	<0.1%	220	4.3	仪器、器皿、医药卫生物品
39 锡铅焊料	HLSnPb39	59~61	≤0.8			183	4.7	电子、电气制品
50 锡铅焊料	HLSnPb50	49~51				210	3.8	计算机、散热器、黄铜制品
58-2 锡铅焊料	HLSnPb58-2	39~41	1.5~2			235		工业及物理仪表等
68-2 锡铅焊料	HLSnPb68-2	29~31				256	3.3	电缆护套、铅管等
80-2 锡铅焊料	HLSnPb80-2	14~19	<0.6%		277	2.8	油壶、容器、散热器	
90-6 锡铅焊料	HLSnPb90-6	3~4			5~6	265	5.9	黄铜和铜制品
73-2 锡铅焊料	HLSnPb73-2	24~26			1.5~2		2.8	铅制品
45 锡铅焊料	HLSnPb45	53~57				200		

手工烙铁焊接经常使用管状焊锡丝。将焊锡制成管状，内部是优质松香添加一定活化剂组成的助焊剂。由于松香很脆，拉制时容易断裂，造成局部缺少焊剂的现象，而多芯焊丝则能克服这个缺点。焊料成分一般是含锡量为 60%~65%的铅锡合金。焊锡丝直径有 0.5 mm、0.8mm、0.9mm、1.0mm、1.2mm、1.5mm、2.0mm、2.3mm、2.5mm、3.0mm、4.0mm、5.0mm；还有扁带状、球状、饼状等形状的成型焊料。

14.2.1.2 膏状焊料

用再流焊设备焊接 SMT 电路板要使用膏状焊料。膏状焊料俗称焊膏，由于当前焊料的主要成分是铅锡合金，故也称铅锡焊膏或焊锡膏。焊膏应该有足够的黏性，可以把 SMT 元器件黏附在印制电路板上，直到再流焊完成。焊锡膏由焊粉和糊状助焊剂组成。

1. 焊粉

焊粉是合金粉末，是焊膏的主要成分。焊粉是把合金材料在惰性气体（如氩气）中用喷吹法或高速离心法生产的，并储存在氮气中避免氧化。焊粉的合金组分、颗粒形状和尺寸对焊膏的特性和焊接的质量（焊点的润湿、高度和可靠性）产生关键性的影响。

焊粉的合金成分和配比决定膏状焊料的温度特性（熔点和凝固点），可因此分为高温焊料、低温焊料、有铅焊料和无铅焊料。不同金属成分的焊粉，其性质与用途也不相同，必须慎重选择。这里还存在热浸析的问题。所谓热浸析，是指当焊料熔融时，焊料的金属成分对被焊接材料的金属成分发生置换反应。浸析率高，容易把镀在焊接面上的金属置换出来，影响焊料的润湿，不利于在焊接面上产生成分一致的、稳定的合金层。因此，为避免浸析率过高，还要分析焊接对象的金属成分。合金粉对其中有害杂质（如锌、铝、镉、铋、铜、铁、砷、硫等）的含量有严格的限制。

铅锡共晶焊锡膏在焊接电子设备中应用最为广泛，但它具有较高的浸析率，不推荐使用在焊接金、银导体的场合。金锡焊料（Au80/Sn20）对于金导体表面有很好的焊接质量，常用于焊接高密度的 SMT 元器件。在铅锡合金中加入银，可以增加焊料的强度，提高耐热性和润湿性，减少对镀银导线表面的浸析，但不宜用于焊接金导体。在铅锡合金中加入铋，既可以提高强度，又可以降低熔点，便于在低温中进行焊接。铅铋焊料有很好的延展性，对金导体的浸析率较低，适用于 SMT 元器件和一般电路的焊接。

理想的焊粉应该是粒度一致的球状颗粒，国内外销售的焊粉的粒度有 140 目、200 目、250 目、350 目和 400 目等数种。粒度用来描述颗粒状物质的粗细程度，原指筛网在每 1 英寸长度上有多少个筛孔（目数）；目数越多，筛孔就越小，能通过的颗粒就越细小。粒度大，即目数多，表示颗粒的尺寸小。粒度的单位是目。焊粉的形状、粒度大小和均匀程度，对焊锡膏的性能影响很大：如果印制电路板上的图形比较精细，焊盘的间距比较狭窄，应该使用粒度大的焊粉配制的焊锡膏。焊粉中的大颗粒会影响焊膏的印刷质量和黏度，微小颗粒在焊接时会生成飞溅的焊料球导致短路。焊粉表面的氧化物含量应该小于 0.5%，最好控制在 80ppm 以下。

常用焊粉的金属成分对温度特性及焊膏用途的影响见表 14-5。对不同粒度等级的焊粉的质量要求见表 14-6。

表 14-5 常用焊粉的金属成分对温度特性及焊膏用途的影响

合金组分（%）				温度特性（℃）		焊 膏 用 途
Sn	Pb	Ag	Bi	熔点	凝固点	
63	37			183	共晶	适用于焊接普通 SMT 电路板，不能用来焊接电极含有 Ag、Ag/Pa 材料的元器件
60	40			183	188	同上
62	36	2		149	共晶	适用于焊接电极含有 Ag、Ag/Pa 材料的元器件
10	88	2		268	290	适用于焊接耐高温元件和需要两次再流焊的首次焊接
96.5		3.5		221	共晶	适用于焊接焊点强度高的 SMT 电路板
42			58	138	共晶	适用于焊接 SMT 热敏元件和需要两次再流焊的第二次焊接

表 14-6 对不同粒度等级的焊粉的质量要求

型 号	多于 80%的颗粒尺寸	应少于 1%的大颗粒尺寸	应少于 10%的微颗粒尺寸
1 型	75~105μm	>140μm	<20μm
2 型	45~75μm	>75μm	
3 型	20~45μm	>45μm	
4 型	20~38μm	>38μm	

2. 焊膏组成和技术要求

焊膏是用合金焊料粉末和触变性助焊剂均匀混合的乳浊液。所谓触变性，是指胶体物质随外力作用而改变黏度的特性。焊膏已经广泛应用在 SMT 的焊接工艺中，可以采用丝网印刷、漏板印刷等自动化涂敷或手工滴涂的方式进行精确的定量分配，便于实现与再流焊工艺的衔接，能满足各种电路组件对焊接可靠性和高密度性的要求。并且，在再流焊开始之前具有一定黏性的焊膏，可以起到固定元器件的作用，使它们不会在传送和焊接过程中发生移位。由于焊接时熔融焊膏的表面张力作用，可以校正元器件相对于 PCB 的微小位移。

对焊膏的技术要求如下：

- （1）合金组分尽量达到或接近共晶温度特性，保证与印制电路板表面镀层、元器件焊端或引脚等的可焊性好，焊点的强度高。
- （2）在存储期间，焊膏的性质应该保持不变，合金焊粉与助焊剂不分层。
- （3）在室温下连续印刷涂敷焊膏时，焊膏不容易干燥，可印刷性（焊粉的滚动性）好。
- （4）焊膏的黏度满足工艺要求，具有良好的触变性。触变性好的焊膏，既能保证用模板印刷时受到压力会降低黏度，使之容易通过网孔、容易脱模，又要保证印刷后除去外力时黏度升高，使焊膏图形不塌落、不漫流，保持形状。涂敷焊膏的不同方法对焊膏黏度的要求见表 14-7。

表 14-7 涂敷焊膏的不同方法对焊膏黏度的要求

涂敷焊膏的方法	丝 网 印 刷	模 板 印 刷	手 工 滴 涂
焊膏黏度 (Pa·s)	300~800	普通密度 SMD: 500~900 高密度、窄间距 SMD: 700~1300	140~300

（5）焊料中合金焊粉的颗粒均匀，微粉少，助焊剂融熔汽化时不会爆裂，保证在再流焊时润湿性好，减少焊料球的飞溅。

3. 常用焊锡膏及其选择依据

现在国内生产焊锡膏的厂家较多，常见的销售商品见表 14-8。在缩写符号 RMA 和 RA 中，R 表示松香助焊剂（Rosin flux）；RMA 型——中等活性（Middle Activated），主要成分为松香加有机活化剂（有机胺、有机卤化物）。RA 型——活化性（Activated），主要成分为松香加无机活化剂。

表 14-8 市场销售的焊锡膏品种及适用范围

使用方式	名 称	化学活性等级	适 用 范 围
丝网印刷	无卤素焊锡膏		航天及军用电子设备
丝网印刷	轻度活化焊锡膏	RMA	军用及专用电子设备
丝网印刷	活化松香焊锡膏	RA	民用消费产品及电子设备
丝网印刷	常温保存焊锡膏	RMA	专用电子设备
定量分配器	定量分配器用焊锡膏	RMA	定量分配器滴涂

（1）要根据电子设备本身的价值和用途选择焊膏的档次。可靠性要求高的产品应该使用高质量的焊膏。当然，高质量焊膏的价格也高。

(2) 根据产品的生产流程、印制电路板的制板工艺和元器件的情况来确定焊膏的合金组分：最常用的焊膏合金组分是 Sn63Pb37 和 Sn62Pb36Ag2；对焊端或引脚采用钎金、钎银厚膜电极或可焊性差的元器件，应该选择含银焊膏。

(3) 根据对印制电路板清洁度的要求以及焊接以后的清洗工艺来选择焊膏：采用溶剂清洗工艺时，要选用溶剂清洗型焊膏；采用水清洗工艺时，要选用水溶性焊膏；采用免清洗工艺时，要选用不含卤素和强腐蚀性化合物的免清洗焊膏；焊接 BGA、CSP 封装的集成电路，芯片的焊点处难于清洗，应该选用高质量的免清洗含银焊膏。

需要特别说明：免清洗焊膏减少了清洗剂的处理与排放、降低了生产能耗与成本、有利于环境保护。免清洗工艺已经被越来越多的现代化电子设备制造企业采用。

(4) 根据印制电路板和元器件的库存时间和表面氧化程度选择不同活性的焊膏。焊接一般 SMT 产品，采用活性 RMA 级的焊膏；高可靠性、航天和军工电子设备，可以选择 R 级活性的焊膏；印制板和元器件存放的时间长，表面氧化严重的，应该采用 RA 级活性的焊膏，焊接以后要清洗。

(5) 根据电路板的组装密度选择不同合金焊粉粒度的焊膏，焊接窄间距焊盘、窄引脚的电路板，要采用粒度 3 型（20~45 $\mu\text{m}$ ）的焊膏。

(6) 根据在电路板上涂敷焊膏的方法和组装密度，来选择不同黏度的焊膏。高密度印刷工艺要求焊膏的黏度高，手工滴涂要求焊膏的黏度低。

#### 4. 焊膏的管理与使用注意事项

(1) 焊膏通常应该保存在 5~10℃ 的低温环境下，可以储存在电冰箱的冷藏室内。

(2) 一般应该在使用的前一天从冰箱中取出焊膏，至少要提前 2h 取出来，待焊膏达到室温后，才能打开焊膏容器的盖子，以免焊膏在解冻过程中凝结水汽。假如有条件使用焊膏搅拌机，则焊膏回到室温只需要 14min。

(3) 观察焊锡膏，如果表面变硬或有助焊剂析出，必须进行特殊处理，否则不能使用；如果焊锡膏的表面完好，则要用不锈钢棒搅拌均匀以后再使用。如果焊锡膏的黏度大而不能顺利通过印刷模板的网孔或定量滴涂分配器，应该适当加入稀释剂，充分搅拌稀释以后再用。

(4) 使用时取出焊膏后，应该盖好容器盖，避免助焊剂挥发。

(5) 涂敷焊膏和贴装元器件时，操作者应该戴手套，避免污染电路板。

(6) 把焊膏涂敷印制板上的关键是要保证焊膏能准确地涂覆到元器件的焊盘上。如果涂敷不准确，必须擦洗掉焊膏再重新涂敷。擦洗免清洗焊膏不得使用酒精。

(7) 印好焊膏的电路板要及时贴装元器件，尽量在 4h 内完成再流焊。

(8) 免清洗焊膏原则上不允许回收使用，如果印刷涂敷的时间间隔超过 1h，则必须把焊膏从模板上取下来并存放到当天使用的焊膏容器里。

(9) 再流焊的电路板，需要清洗的应该在当天完成清洗，防止焊锡膏的残留物对电路产生腐蚀。

### 14.2.1.3 助焊剂

#### 1. 助焊剂的作用

焊剂与焊料不同，它是用来增加润湿，以帮助和加速焊接的进程。焊剂的助焊能力，依靠焊剂的活性。焊剂的活性是指从金属表面迅速去除氧化物膜的能力。焊剂的作用原理可分为化学的和物理的两个方面。

#### (1) 化学作用

化学作用，主要表现在达到焊接温度前，能充分地使金属表面的氧化物还原或置换，形成新

的金属盐类化合物。松香是有机酸类焊剂，其主要成分是松香酸，松香酸在 140℃时，活性表现得比较充分。如果在进行铜或铜合金焊接时，在达到焊接温度前，氧化铜和松香酸就能充分发生化学反应，生成松香酸铜（金属盐）；而松香酸铜又受热分解，除生成活性铜外，还可以重新聚合成松香酸。生成的活性铜可与熔融焊料中的锡反应生成铜锡合金，从而达到焊接的目的。其他一切有机酸的化学反应都与此相似。

(2) 物理作用

物理作用，主要表现在两个方面：一是改善焊接时的热传导作用，促使热量从热源向焊接区扩散、传送。因为焊接时，烙铁头和被焊金属的接触不可能是平整的，其间隙中的空气就起到隔热作用。加入焊剂后，熔融焊剂填充空隙，可使焊料和被焊金属迅速加热，从而提高了热传导性。二是施加焊剂能减小熔融焊剂的表面张力，提高焊料的流动性。熔融焊料不易流动的主要因素之一是表面张力的影响，在焊接温度范围内，当焊剂温度接近临界温度时，其表面张力最小，流动性最好，使熔融焊料良好地润湿。其实质是助焊剂中的氯化物、酸类同焊接面上的氧化物发生还原反应，从而除去氧化膜。反应后的生成物变成悬浮的渣，漂浮在焊料表面。

2. 对助焊剂的要求

一种性能良好的焊剂既能满足焊接工艺要求，具有良好的助焊性能，又要具有使用的安全性。具体要求如下：

(1) 具有快速去除表面氧化物、防止再氧化、降低焊料表面张力等特性，这是焊剂必须具备的基本性能。在加温过程中能较快地去除金属表面氧化物，增加流动性和润湿性，起到良好的助焊作用。

(2) 焊剂的熔点应比焊料低，在焊料熔化之前，焊剂可充分发挥其助焊作用。

(3) 焊剂的表面张力要比焊料小，润湿扩展速度比熔化的焊料快。一般要求树脂型焊剂的扩展率在 90%以上；免清洗型焊剂的扩展率在 80%以上。

(4) 焊剂的黏度和相对密度要比焊料小。黏度大会使润湿扩展困难，密度大则不能很好地覆盖焊料表面。

(5) 焊接时不产生焊珠飞溅，不产生有毒气体和强烈的刺激气味，有利于保护环境和生产人员的身心健康。

(6) 焊后残留物少、易去除，并且基本无腐蚀、不吸湿、不导电、不粘手。

(7) 常温下长期储存不变质。

实际上要同时满足上述各项要求是很困难的，而且有些要求是互相制约的。在很多情况下，可根据使用场合对焊剂的组成成分作适当的调整，选用合适的焊剂。

3. 助焊剂的分类

了解焊剂的分类对正确地使用焊剂是十分重要的，助焊剂的分类及主要成分见表 14-9。

表 14-9 助焊剂的分类及主要成分

助焊剂	无机系列	酸	正磷酸 ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )
			盐酸 ( $\text{HCl}$ )
			氟酸
		盐	氯化物 ( $\text{ZnCl}_2$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{SnCl}_2$ 等)
	有机系列	有机酸 (硬脂酸、乳酸、油酸、氨基酸等)	
		有机卤素 (盐酸苯胺等)	
		胺基酰胺、尿素、 $\text{CO}(\text{NH}_4)_2$ 、乙二胺等	
	松香系列	松香	
		活化松香	
		氯化松香	

### (1) 无机助焊剂

无机助焊剂具有高腐蚀性,由无机酸和盐组成,如钠或钾、氯化锌等。这些助焊剂能够去掉铁和非铁金属的氧化膜层。但对不锈钢和镍铁,用这些较弱的助焊剂都不能锡焊。

无机助焊剂一般用于非电子应用,如铜管的铜焊。无机焊剂的强腐蚀作用容易损伤金属及焊点,不能在电子设备焊接中使用。无机焊剂用机油乳化以后,可制成一种膏状物质,俗称焊油。焊油可以帮助焊接那些难以焊接且焊接后容易清洗的物品。虽然焊油的活性很强,焊接后可用溶剂清洗,但在电子设备的电路焊点中,像接线柱间隙内、导线绝缘皮内、元器件根部等溶剂难以到达的部位,就很难清除焊油的残渣。因此,除非特别准许,一般不允许使用无机焊剂焊接电子设备。

### (2) 有机酸助焊剂

有机酸(OA)助焊剂比松香助焊剂要强,但比无机助焊剂要弱。在助焊剂活性和可清洁性之间,它提供了一个很好的平衡。这些助焊剂含有极性离子,很容易用极性溶剂去掉,如水。由于它们在水中的可溶性,OA助焊剂是环保上所希望的,其化学含量由供应商来控制。

OA助焊剂材料已成功地用作回流焊接引脚穿孔组件中环形焊接的助焊剂涂层。甚至在通过回流焊接之后,可以很容易地用水清洗。水溶性锡膏在要求清洁的应用中,或在低残留或免洗锡膏存不足的情况下变得更具有优势。现在,水溶性锡膏已被广泛应用。

### (3) 松香助焊剂

松香的主要成分是松香酸(约占80%)和海松酸等。松香在常温下几乎没有任何化学活力,呈中性;当被加热到70℃以上时开始融化,液态松香有一定的化学活性,呈现较弱的酸性,可与金属表面的氧化物发生化学反应,变成松香酸铜等化合物悬浮在液态焊锡表面。这也起到使焊锡表面不被氧化的作用,同时还能降低液态焊锡表面的张力,增加它的流动性。焊接完毕恢复常温以后,松香又变成稳定的固体,无腐蚀性,绝缘性强。因此,正确使用松香是获得合格焊点的重要条件。

松香很容易溶于酒精、丙酮等溶剂。在电子焊接中,常常将松香溶于酒精制成“松香水”,松香同酒精的比例一般以1:3为宜,也可以根据使用经验增减;但不宜过浓,否则使用时流动性变差。在松香水中加入活化剂如三乙醇胺,可以增加它的活性。不过这在一般手工焊接中并非必要,只是在浸焊或波峰焊的情况下才使用。

应当注意:松香加热到300℃以上或经过反复加热,就会分解并发生化学变化,成为黑色的固体,失去化学活性。有经验的焊接操作者都知道,碳化发黑的松香不仅不能起到帮助焊接的作用,还会降低焊点的质量。

氢化松香焊剂是从松脂中提炼而成的,常温下性能比普通松香稳定,加热后酸价高于普通松香,因此有更强的助焊作用。

## 4. 水溶性焊剂和免清洗焊剂

(1) 当前因保护大气臭氧层的需要,国内外正大力研制和开发水溶性焊剂和免清洗焊剂。水溶性焊剂除具备焊剂的通用要求外,还应具有以下特性:

- ① 助焊性较强,能适应各种元器件引线的焊接,去氧化能力强于树脂型焊剂和免清洗焊剂。
- ② 焊后残留物易用水清洗,且不污染环境。
- ③ 清洗后的焊点符合洁净度要求,不腐蚀,不降低电绝缘性能。
- ④ 储存稳定、无毒性。

### (2) 使用水溶性焊剂时应注意的问题

- ① 在使用过程中,需经常添加专用的稀释剂,调节活性剂浓度,以确保取得良好的焊接效果。
- ② 由于水溶性焊剂不含松香树脂,锡铅合金焊料的防氧化显得更为必要。为确保水清洗后

具有良好的洁净度,添加的焊料抗氧化剂必须具有水溶性。

③ 采用纯度较高的去离子水清洗,清洗温度一般以 45~60℃ 为宜,有时可达 70~80℃。

④ 利用水溶性焊剂焊接的焊点,经过水清洗后,要用离子净度仪测定其离子残留量,考核水清洗效果是否达到要求。

(3) 在使用免清洗焊剂时,应符合以下特性要求

① 可利用浸渍、发泡、喷射或喷雾等多种方式涂覆。

② 与元器件、PCB 所用材料以及现有设备兼容性好。

③ 无毒性、气味小,操作安全、焊接时烟雾少、不污染环境。

④ 可焊性好,焊接质量高,不致因焊剂质量造成虚焊、漏焊、吊桥、桥接、拉尖和焊料球等焊点缺陷。

⑤ 焊后残留物极少,板面干净、色浅、无黏性、无腐蚀性,且具有较高的耐湿性和表面绝缘电阻。

⑥ 焊后 PCB 离子残留量要符合免清洗洁净度的要求。

⑦ 具有较长的储存期,一般一年以上。室温放置时不会随温度变化而出现沉淀或分层现象,具有良好的稳定性。

#### 5. 助焊剂的选用

焊剂选用有两个准则:一要考虑焊剂效力(即促进焊料润湿能力),二要考虑焊剂的腐蚀性(即焊剂残留物影响焊接的能力)。二者是相互矛盾的,效力高的焊剂往往腐蚀性也大,若要焊剂腐蚀性小,其效力也低,选用时要综合考虑。

### 14.2.1.4 阻焊剂

#### 1. 阻焊剂的应用特点

为了提高印制板的焊接质量,特别是浸焊的质量,常在印制基板上,除焊盘以外的印制线条上全部涂上防焊材料,这种防焊材料称为阻焊剂,采取这种措施,有如下优点:

(1) 可以使浸焊或波峰焊时桥接、拉头、虚焊和连条等毛病大为减少或基本消除,板子的返修率也大为降低,提高焊接质量,保证产品的可靠性。

(2) 除了焊盘外,其他印制连线均不上锡,这样可节省大量的焊料。同时,由于只有焊盘部位上锡,受热少,冷却快,降低了印制板的温度,起到了保护塑封元器件及集成电路的作用。

(3) 阻焊剂本身具有三防性能和一定的硬度,印制板表面形成一层很好的保护膜,还可起到防止碰撞等引起机械损伤的作用。

(4) 使用阻焊剂特别是带有色彩的阻焊剂,使印制板的板面显得整洁、美观。

#### 2. 阻焊剂的种类

阻焊剂的种类很多,一般分为干膜型阻焊剂和印料型阻焊剂。目前广泛使用的是印料型阻焊剂,这种阻焊剂又可分为热固化和光固化两种。

(1) 热固化阻焊剂。其特点是附着力强,能耐 300℃ 高温,但要在 200℃ 高温下烘烤两小时,因而板子容易变形,能源消耗大,生产周期长。

(2) 光固化阻焊剂(光敏阻焊剂)。其特点是在高压汞灯照射下,只要 2~3min 就能固化,因而可节约大量能源,提高生产效率,并便于组织自动化生产。这种阻焊剂毒性低,环境污染小。但这种阻焊剂易溶于酒精,能和印制板上喷涂的助焊剂中的酒精成分相溶而影响板子的质量。

14.2.1.5 SMT 所用的黏合剂

黏合剂在电子设备中的应用已经有了长久的历史，但它作为在焊接前把元器件固定在电路基板上的一种手段，却是 SMT 技术创造的新方法。在传统的 THT 安装方法中，元器件在焊接以前，是把引线插入印制板的通孔，靠引线的弯折或整形产生的弹力固定在板上。而 SMT 则完全不同，只需要把元器件简单地放置在电路基板表面上，用黏合剂粘接固定后使用波峰焊设备进行焊接。使用波峰焊焊接的电路板，由于元器件在焊接时位于基板的下面，所以必须使用黏合剂来固定它们。用于黏贴 SMT 元器件的黏合剂，俗称贴片胶或贴装胶。

在使用再流焊方法的 SMT 电路板上一般不需要使用黏合剂，因为漏印在板上的焊锡膏已经可以粘住元器件。

1. SMT 工艺对黏合剂的要求

(1) 对应用于 SMT 工艺来说，理想的黏合剂应该具有下列性能：成分简单，容易制造；存放期长，不需要冷藏而不易变质；良好的填充性能，能填充电路板与元器件之间的间隙；不导电；触变性好，滴下的轮廓良好，不流动（不会因流动而污染元器件的焊盘）；无腐蚀；充分的预固化黏性，能靠黏性从贴装头上取下元器件；充分的固化粘接强度，能够可靠地固定元器件；化学性质稳定，与助焊剂和清洗剂不会发生化学反应；颜色适于视觉检查。

(2) 从加工操作的角度考虑，黏合剂还应该符合下述要求：使用操作方法简单；固化温度低（不超过 140~180℃，一般≤140℃）、耗能少、时间短（≤5s）；在波峰焊的温度（250℃±5℃）下不会熔化；在固化以后，用电烙铁加热能再次软化，容易取下元器件。

(3) 从环境保护出发，黏合剂还要具有阻燃性、无毒性、无气味、不挥发。

2. SMT 工艺常用的黏合剂

在现有的许多种黏合剂中，热固性黏合剂最适合自动化 SMT 贴装工艺。常用品种的构成与特点见表 14-10。

表 14-10 SMT 工艺常用贴片胶的构成与固化方法

贴片胶的基本树脂	特 性	固 化 方 法
环氧树脂	热敏感，必须低温储存才能保持使用寿命（5℃下 6 个月，常温下 3 个月）。温度升高使寿命缩短，40℃时，寿命和质量迅速下降。 固化温度较低，固化速度慢，时间长。 粘接强度高，电气特性优良。 高速点胶性能不好	单一热固化
丙烯酸酯	性能稳定，不必特殊低温储存，常温下使用寿命 12 个月。 固化温度较高，但固化速度快，时间短。 粘接强度和电气特性一般。 高速点胶性能优良	双重固化： 紫外光+热

相应地，市场上能够买到的贴片胶也有两大类。

(1) 环氧树脂类贴片胶 在固化过程中它所产生的气体对人体有害，应该安装排气系统。单组分环氧树脂贴片胶要求低温保存，在烘箱内进行固化，可以加快聚合反应速度；双组分环氧树脂低温固化型贴片胶，其典型重量比配方为环氧树脂 63%、无机填料 30%、胺系固化剂 4%和无机颜料 3%。

(2) 聚丙烯类贴片胶 它不能在室温下固化，必须采用适当的设备。固化设备应配有通风系统，固化温度约为 140℃，时间约为数十秒到几分钟。以丙烯酸酯或甲基丙烯酸酯为基料的 UV 贴片胶，采用紫外线光照和烘箱加热固化；以环氧丙烯酸树脂为基料的 UVI 贴片胶，采用紫外线光照和红外线热辐射相结合进行固化。



14.2.2 焊接机理和方法

14.2.2.1 焊接机理

1. 焊接过程

锡焊过程从工艺上分析，大致可分为以下三个步骤：

- (1) 预热焊料和母材的结合面。
- (2) 熔融焊料，并在助焊剂的作用下填入工件缝隙与母材发生反应，扩散生成界面合金薄层。
- (3) 焊料冷却、结晶，在焊接处形成焊点。

这三个步骤没有明显的界限，而是紧密联系的一个完整的过程。但从焊点在这短暂的时间内形成的物理、化学过程看，焊料与母材之间经过了三个变化阶段：熔融焊料在被焊金属表面润湿阶段；熔融焊料在被焊金属表面扩展阶段；在接触界面形成合金阶段。

2. 润湿作用

润湿是焊接中的重要阶段，没有润湿，焊接就无法进行。任何液体和固体接触时，都会产生程度不同的润湿现象。在焊接时，熔融焊料会像任何液体那样，黏附在破爆金属表面，这种现象就称为润湿。越容易黏附，润湿就越好。

熔融焊料在金属表面流动的范围，与作用在界面间的表面张力有关。表面张力影响着焊点的形状。焊点形成在忽略重力的情况下，完全由表面张力决定，界面面积和自由表面积都趋向于尽可能小，但它们之间又是相互制约的，一个面积减少，将导致另一个不能减少，最后是综合结果，其形状是个球冠状液滴，如图 14-4 所示。通常以润湿角  $\theta$  来描述焊料与被焊金属表面润湿的难易， $\theta$  是指焊料与被焊接金属的交界面和焊料与空气间的交界面之间形成的夹角。当  $\theta$  角越小，润湿好，可焊性就越好， $\theta$  角为 0 时，为完全润湿；反之， $\theta$  角越大，润湿差，可焊性越差， $\theta$  角为 180 时为完全不润湿。

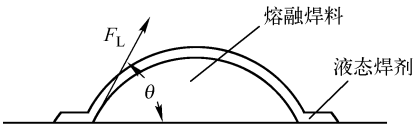


图 14-4 球冠状液滴

3. 扩散作用

在正常条件下，金属原子都以其平衡位置为中心进行着不停的热运动，这种运动随着温度升高，其频率逐步增加。当达到一定的温度时，某些原子就具有足够的能量脱离原本的位置，这个现象就叫扩散。速度和扩散量与温度和时间密切相关。

合金层是锡焊中极为重要的结构层，没有合金层或合金量少，将出现虚焊、假焊。在焊接过程中，还会产生其他方面的影响。例如，烙铁头是紫铜做的，焊料经过长时间的连续高温作用，含铜量会越来越高，使焊料的特性变劣、熔点升高，焊点的表面变得粗糙发白、脆性增加，成为溶解不充分的半凝固体。

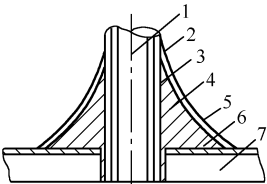


图 14-5 焊点剖面示意图

1—母材；2—镀层；3—合金层；4—焊料  
层；5—表面层；6—铜箔；7—基板

4. 界面层的凝固与结晶

焊接后，焊料开始冷却，在焊料和母材金属界面上，形成的合金层，称为界面层。在冷却时，界面层首先以适当的合金状态开始凝固，形成金属结晶。而后，结晶向未凝固的焊料方向生长，最后形成焊点。

焊点虽然可以根据不同的设计，得到不同的用途，但焊点的结构大体相同，以印制板上的焊点为例，结构如图 14-5 所示。

焊点结构可分为下述四个部分：

(1) 母材 指被锡焊的金属。在电子工业中，就是元器件引线的材料（包括引线表面的镀层）及印制板的铜箔。

(2) 合金层 如前所述，它是母材与焊料之间形成的金属化合物层。

(3) 焊料层 通常是指锡焊料。

(4) 表面层 它可能是焊剂层、氧化层或涂覆层。如果焊剂没有被全部蒸发掉，则残留的焊剂会涂于焊点表面和四周成为覆盖层。若为松香焊锡，则无腐蚀性。通常焊点表面有一层薄而致密的氧化亚锡（ $\text{SnO}_2$ ）具有良好的抗腐蚀性，对焊点具有保护作用。但是，如果焊点表面留有腐蚀性焊剂残留物，则必须清洗。

#### 14.2.2.2 焊接方法分类

随着焊接技术的发展，焊接方法也在传统手工焊接的基础上，出现了自动焊接技术，即使用机器成批进行焊接的方法。

##### 1. 手工焊接

手工焊接是焊接技术的基础，也是电子设备组装的一项基本操作技能。手工焊接适用于新产品的试制、小批量生产、具有特殊要求的高可靠产品、某些不便使用机器焊接的场合，以及电子设备在生产和维修过程需要进行补焊、修复焊点或更换元器件等。迄今，还没有哪一种焊接方法可以完全代替手工焊接，因此在电子设备装配中，这种方法仍占有重要地位。

手工焊接根据在焊接前接点的连接方式不同，又分为：

(1) 绕焊 将被焊元器件的引线或导线缠绕在接点上进行焊接。这种方法焊接强度最高，应用最广。高可靠性整机产品的接点，通常都采用这种方法焊接。

(2) 钩焊 将被焊接的元器件的引线或导线钩接在接点的眼孔中进行焊接。它适用于不便缠绕而又要求有一定机械强度和便于拆焊的接点上。

(3) 搭焊 将被焊接的元器件的引线或导线，搭在接点上进行焊接。它适用于要求便于调整和改焊的临时焊接点上，或某些要求不高的产品中。

(4) 插焊 将导线插入洞孔形接点中进行焊接。它适用于插头座带孔的圆型插针、插孔，以及印制板的插焊。

##### 2. 机器焊接

随着电子技术的发展，电子设备朝多功能、高可靠性方向发展。电路越来越复杂，设备组装密度也越来越高，手工焊接虽能满足高可靠性的要求，但很难同时满足焊接高效率的要求。同时由于印制板在电子设备中的应用，使焊点由空间不规则分布变为平面规则排列。这一重大变化为自动焊接的应用和发展创造了有利条件。

20 世纪 40 年代初，电子工业发达的国家已在电子设备的焊接中，采用了浸焊和波峰焊工艺。浸焊是将装好元器件的印制板在熔化的锡锅内，一次完成印制板上全部焊接点的焊接。波峰焊采用波峰焊机一次完成印制板上全部焊接点的焊接。到 50 年代，各种自动焊接设备开始取得专利。60 年代自动焊接技术已在世界各国得到广泛应用。70 年代开始采用二次焊接工艺，出现了自动顺序焊接系统。80 年代以来，随着表面安装元件的应用，又出现了解决表面安装技术的自动焊接工艺和设备。

我国于 1964 年制造出第一台波峰焊接机，自动焊接技术开始在我国得到重视和发展。目前，在电子行业中，自动焊接技术正得到广泛的应用。在工业化大批量生产电子设备的企业里，常用的自动焊接设备有浸焊机、波峰焊机及清洗设备、助焊剂自动涂敷设备等其他辅助装置，SMT 工

艺采用的典型焊接设备是再流焊设备以及锡膏印刷机、贴片机等组成的焊接流水线。自动焊接的工艺流程如图 14-6 所示。

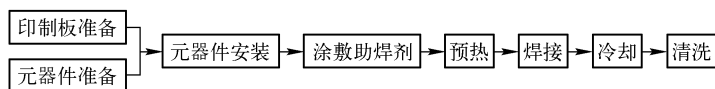


图 14-6 自动焊接工艺流程

在自动生产线上的整个生产过程，都是通过传送装置连续进行的。在自动化生产流程中，除了有预热的工序以外，基本上同手工焊接过程类似。电路板进入焊锡槽前的加热工序可以使助焊剂达到活化点，可以是热风加热，也可以用红外线加热。涂助焊剂一般采用喷涂法或发泡法，即用气泵将助焊剂溶液雾化或泡沫化后均匀地喷涂或蘸敷在印制板上。冷却一般采用风扇强迫降温。

清洗设备有机械式及超声波式两类。超声波清洗机由超声波发生器、换能器及清洗槽三部分组成，主要适合于使用一般方法难于清洗干净或形状复杂、清洗不便的元器件清除油类等污物。其主要效应是利用超声波复变压力的峰值大于大气压力时产生的空化现象这一原理，即由于压力的迅速变化，在液体中产生了许多充满气体或蒸汽的空穴，空穴最终崩溃，能产生出强烈的冲击波，作用于被清洗的零件；渗透在污垢膜与零件基体表面之间的这一强烈冲击，足以削弱污垢或油类与基体金属的附着力，从零件表面上清除掉油类或其他污物，达到清洗的目的。但近几年清洗设备和清洗工艺有淡出电子制造企业的趋势，这不仅是因为排放清洗剂废液涉及环保问题，还由于成本竞争要求减少清洗环节的能源消耗和加工时间。在大多数电子设备制造企业中，采用免清洗助焊剂进行焊接已经成为主流工艺。

除了上述几种焊接方法以外，在微电子器件组装中，超声波焊、热超声金丝球焊、机械热脉冲焊都有各自的特点。又如新近发展起来的激光焊，能在几微秒的时间内将焊点加热到熔化而实现焊接，热应力影响小，是一种很有潜力的焊接方法。

随着计算机技术的发展，在电子焊接中使用微处理器控制的焊接设备已经普及。例如，微机控制电子束焊接已在我国研制成功。还有一种光焊技术，已经应用在 CMOS 集成电路的全自动生产线上，其特点是采用光敏导电胶代替焊剂，将电路芯片粘在印制板上用紫外线固化焊接。

随着电子工业的不断发展，传统的方法将不断改进和完善，新的高效率的焊接方法也将不断涌现。

### 14.2.3 通用手工焊接技术

#### 14.2.3.1 手工焊接的要求和准备

除了含有大量铬、铝等元素的一些合金材料不宜采用锡焊焊接外，其他金属材料大都可以采用锡焊焊接。锡焊方法简便，只需要使用简单的工具（如电烙铁）即可完成焊接、焊点整修、元器件拆换、重新焊接等工艺过程。在电子工程技术里，它是使用最早、最广泛的焊接方法。

##### 1. 手工焊接的要求

###### （1）焊件必须具有良好的可焊性

可焊性，是被焊接的金属材料与焊料在适当的温度和助焊剂的作用下，形成良好结合的能力。铜是导电性能良好且易于焊接的金属材料。其他一些金属，如金、银、铁、镍等，也都具有一定的可焊性。但它们不是成本高就是导电性能差，所以不如铜使用广泛。对于可焊性差的金属材料，有时采用较强的有机酸助焊剂也可获得良好的结合，但焊后必须彻底清洗。

###### （2）焊件表面必须保持清洁

熔融焊料能在金属表面漫流动是靠毛细管力实现的，但这必须具备一个重要条件，即母材表

面必须是清洁的,因为只有在清洁条件下,焊料与母材原子间的距离最小,能够吸引扩散。不允许金属表面有任何污染妨碍润湿,污染物和油脂层在焊接前必须彻底清除。金属表面与空气接触就要生成氧化层,轻度的氧化层可以通过焊剂来消除,氧化程度严重时,单凭焊剂是无法消除的,需采用化学(如酸洗)或机械的方法清除。

### (3) 要使用合适的助焊剂

不同的焊接工艺,应该选择不同的助焊剂,如镍铬合金、不锈钢、铝等材料,没有专用的特殊焊剂是很难实施锡焊的。在焊接印制电路板等精密电子设备时,为使焊接可靠稳定,通常采用以松香为主的助焊剂。

### (4) 焊件要加热到适当的温度

焊接时,通过热能来熔化焊锡和加热焊接对象,使锡、铅原子获得足够的能量渗透到被焊金属表面的晶格中而形成合金。焊接温度过低,对焊料原子渗透不利,无法形成合金,极易形成虚焊;焊接温度过高,会使焊料处于非共晶状态,加速焊剂分解和挥发速度,使焊料品质下降,严重时还会导致印制电路板上的焊盘脱落。

需要强调的是,不但焊锡要加热到熔化,而且应该同时将焊件加热到能够熔化焊锡的温度。

### (5) 合适的焊接时间

焊接时间,是指在焊接全过程中,进行物理和化学变化所需要的时间。它包括被焊金属达到焊接温度的时间、焊锡的熔化时间、助焊剂发挥作用及生成金属合金的时间等几部分。当焊接温度确定后,就应根据被焊件的形状、性质、特点等来确定合适的焊接时间。焊接时间过长,易损坏元器件或焊接部位;过短,则达不到焊接要求。一般,每个焊点焊接一次的时间最长不超过 5s。

### (6) 焊料的成分和性能要符合焊接要求

焊料的成分和性能应与被焊接金属材料的可焊性、焊接的温度和时间、焊点的强度等相适应,应达到易焊和牢焊的目的。此外,尚要注意焊料中的不纯杂质对焊接的不良影响。

## 2. 焊接前的准备——镀锡

为了提高焊接的质量和速度,避免虚焊等缺陷,应该在装配以前对焊接表面进行可焊性处理——镀锡。在电子元器件的待焊面(引线或其他需要焊接的地方)镀上焊锡,是焊接之前一道十分重要的工序,尤其是对于一些可焊性差的元器件,镀锡更是至关重要的。专业电子生产厂家都备有专门的设备进行可焊性处理。

镀锡也叫“搪锡”,实际就是液态焊锡对被焊金属表面浸润,形成一层既不同于被焊金属又不同于焊锡的结合层。由这个结合层将焊锡与待焊金属这两种性能、成分都不相同的材料牢固连接起来。

### 14.2.3.2 常用手工焊接工具

电烙铁是手工焊接的基本工具。电烙铁有使用灵活、容易掌握、操作方便、适应性强、焊点质量易于控制、所需设备投资费用少等优点。电烙铁是利用电流通过电热丝加热烙铁头的原理制成的,电烙铁的发热量与耗电瓦数成比例。

烙铁焊技术不仅应用广泛,而且也在不断发展。电烙铁的种类也在不断地增多,按电烙铁加热方式分类有:直热式、感应式等;按烙铁的发热能力(消耗功率)分类:有 20W、30W、…、500W 等;从功能分,有单用式、两用式、调温式、恒温式等。此外,还有温控烙铁、微型烙铁、超声波烙铁、半自动送料焊枪,还有特别适合于野外维修使用的低压直流电烙铁和气体燃烧式烙铁等多种类型。

## 1. 直热式电烙铁

### (1) 分类

最常用的是单一焊接使用的直热式电烙铁，它又可以分为内热式和外热式两种。

① 内热式电烙铁。其外形如图 14-7 所示。热芯烙铁头加热器由电热丝缠绕在密闭的陶瓷管上组成，然后插在烙铁头里面，直接对烙铁头加热，所以称为内热式。其特点是热效率高、温升快、体积小、重量轻、耗电低，但加热器制造较复杂，烧断后无法修复，而且烙铁头是固定的，温度不能控制，使用不同的烙铁头受到限制。常用的规格有 20W、30W、50W 等，主要用于印制电路板的焊接。

② 外热式电烙铁。它是应用广泛的普通型电烙铁，其外形如图 14-8 所示。加热器是在外壳内的缠绕在云母材料上的电阻丝，烙铁头置于电热丝内部，故称外热式电烙铁。其特点是构造简单，价格便宜，但热效率低，温升慢、体积较大，而且烙铁的温度不能有效地控制，只能靠烙铁头的大小稍作调节。

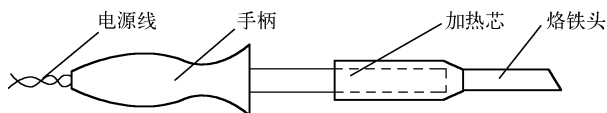


图 14-7 内热式电烙铁的外形示意图

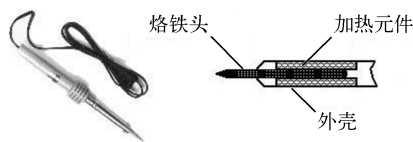


图 14-8 外热式电烙铁的外形与结构

电烙铁的规格一般用电功率来表示，也有按使用电压来分的，如 220V、110V、36V 等。外热式电烙铁主要用于导线、接地线和接线板的焊接。

### (2) 组成

电烙铁的种类虽然很多，但基本结构是一样的，都是由发热部分、储热部分和操作手柄等组成。

① 发热元件。电烙铁的能量转换部分是发热元件，俗称烙铁芯。它由镍铬发热电阻丝缠在云母、陶瓷等耐热、绝缘材料上构成。电子设备生产中最常用的内热式电烙铁的烙铁芯，是将镍铬电阻丝缠绕在两层陶瓷管之间，再经过烧结制成。

② 烙铁头。存储、传递热能的烙铁头一般都是用紫铜材料制成的。根据表面电镀层的不同，烙铁头可以分为普通型和长寿型。普通内热式烙铁头的表面通常镀锌，镀层的保护能力较差。在使用过程中，因为高温氧化和助焊剂的腐蚀，普通烙铁头的表面会产生不沾锡的氧化层，需要经常清理和修整。

长寿型烙铁头的寿命比普通烙铁头延长数十倍，这是手工焊接工具的一大进步。一把电烙铁备上几个不同形状的长寿命烙铁头，可以适应各种焊接工作的需要。长寿命烙铁头通常是在紫铜外面渗透或电镀一层耐高温、抗氧化的铁镍合金，所以这种电烙铁的使用寿命长，维护少。长寿命烙铁头看起来与普通烙铁头没有差别，最简单的判断方法是把烙铁头去靠近磁铁，如果两者之间有吸合磁力，说明烙铁头表面渗镀了铁镍，则是长寿型烙铁头；反之，则是普通烙铁头。

③ 手柄。它一般用耐热塑胶或木料制成。如果设计不良，手柄的温升过高会影响操作。

④ 接线柱。它处于发热元件同电源线的连接处。必须注意：一般电烙铁都有三个接线柱，其中一个接金属外壳的。如果要考虑防静电问题，接线时应该用三芯线将电烙铁外壳接保护零线。

## 2. 感应式电烙铁

感应式电烙铁也叫速热烙铁，俗称焊枪，其结构如图 14-9 所示。它里面实际上是一个变压器，这个变压器的次级一般只有一匝。当变压器初级通电时，次级感应出的大电流通过加热体，使同它相连的烙铁头迅速达到焊接所需要的温度。

这种烙铁的特点是加热速度快。一般通电几秒钟，即可以达到焊接温度。因此，不需要像直热式

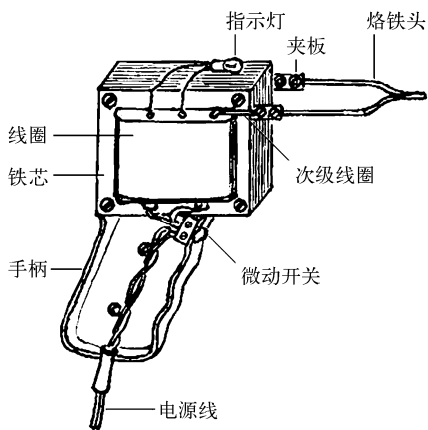


图 14-9 感应式电烙铁结构示意图

烙铁那样持续通电。它的手柄上带有电源开关，工作时只需要按下开关几秒钟即可进行焊接，特别适合于断续工作方式下使用。

由于感应式电烙铁的烙铁头实际上是变压器的次级绕组，所以对一些电荷敏感器件，如绝缘栅型 MOS 电路，常会因感应电荷的作用而损坏器件。因此，在焊接这类电路时，不能使用感应式电烙铁。

### 3. 吸锡器和两用式电烙铁

在焊接或维修电子设备的过程中，有时需要把元器件从电路板上拆卸下来。拆卸元器件是与焊接相反的操作，也叫做拆焊或解焊。常用的拆焊工具有吸锡器和两用电烙铁。

(1) 吸锡器 它是常用的拆焊工具，使用方便，价格适中。如图 14-10 所示，吸锡器实际是一个小型手动空气泵，压下吸锡器的压杆，就排出了吸锡器腔内的空气；释放吸锡器压杆的锁钮，弹簧推动压杆迅速回到原位，在吸锡器腔内形成空气的负压力，就能够把熔融的焊料吸走。在电烙铁加热的帮助下，用吸锡器很容易拆焊电路板上的元器件。

(2) 两用电烙铁 图 14-11 所示的是一种焊接、拆焊两用的电烙铁，又称吸锡电烙铁。它是在普通直热式电烙铁上增加吸锡结构组成的，使其具有加热、吸锡两种功能。

### 4. 恒温式电烙铁

目前使用的外热式和内热式电烙铁的温度一般都超过了  $300^{\circ}\text{C}$ ，这对焊接晶体管、集成电路等是不利的。在质量要求较高的场合，通常需要恒温电烙铁，如图 14-12 所示。

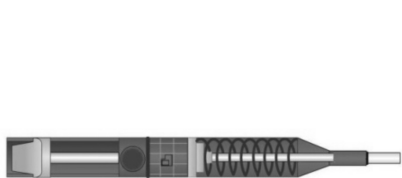


图 14-10 吸锡器



图 14-11 两用电烙铁示意图



图 14-12 恒温式电烙铁示意图

恒温电烙铁有电控和磁控两种。电控恒温电烙铁用热电偶作为传感元件来检测和控制烙铁头的温度。当烙铁温度低于规定值时，温控装置内的电子电路控制半导体开关元件或继电器接通电源，给电烙铁供电，使电烙铁温度上升，温度一旦达到预定值，温控装置自动切断。如此反复动作，使烙铁头基本保持恒温。

磁控恒温电烙铁是借助于软磁金属材料在达到某一温度（居里点）时会失去磁性这一特点，制成磁性开关来达到控温目的。如果需要不同的温度，可调换装有不同居里点的软磁金属的烙铁头，其居里点不同，失磁的温度也不同。烙铁头的工作温度可在  $260\sim 450^{\circ}\text{C}$  范围内任意选取。

恒温式烙铁具有下述明显的优越性。

- (1) 恒温烙铁是断续加热，可以比普通电烙铁节电二分之一左右。
- (2) 升温时间快，只需  $40\sim 60\text{s}$ 。
- (3) 烙铁头采用渗镀铁镍的工艺，不需要修整。
- (4) 烙铁头温度不受电源电压、环境温度的影响。

(5) 由于烙铁头始终保持在适于焊接的温度范围内, 焊接不易氧化, 可减少虚焊, 提高焊接质量。

(6) 由于温度变化范围很小, 电烙铁不会产生过热现象, 从而延长了使用寿命, 同时也能防止被焊接的元器件因温度过高而损坏。

### 5. 热风枪

热风枪又称贴片电子元器件拆焊台。它专门用于表面贴片安装电子元器件(特别是多引脚的 SMD 集成电路)的焊接和拆卸。热风枪由控制电路、空气压缩泵和热风喷头等组成。其中, 控制电路是整个热风枪进行温度和风力控制的核心部件; 空气压缩泵是热风枪的心脏, 负责热风枪的风力供应; 热风喷头是将空气压缩泵送来的压缩空气加热到可以使 BGA IC 上焊锡熔化的部件。其头部还装有可以检测温度的传感器, 把温度信号转变为电信号送回电源控制电路板; 各种喷嘴用于装拆不同的表面贴片元器件。

### 14.2.3.3 手工焊接操作方法

手工焊接是利用电烙铁实现金属之间牢固连接的一项工艺技术。这项工艺看起来很简单, 但要保证高质量的焊接却是相当不容易的, 因为手工焊接的质量受诸多因素的影响及控制, 必须大量实践, 不断积累经验, 才能真正掌握这门工艺技术。下面介绍的一些具体方法和注意要点, 都是实践经验的总结, 是初学者迅速掌握焊接技能的捷径。

#### 1. 焊接操作的正确姿势

掌握正确的操作姿势, 可以保证操作者的身心健康, 减少或杜绝劳动伤害。为减少焊剂加热时挥发出来的化学物质对人的危害, 减少有害气体的吸入量, 一般情况下, 烙铁到鼻子的距离应该不少于 20cm, 通常以 30cm 为宜。

在焊接时, 电烙铁的握持方法, 并无统一规定, 应以不易疲劳、便于用力 and 操作方便为原则。一般有正握、反握和笔握三种握法, 正握法适用于弯烙铁头操作或直烙铁头在大型机架上焊接; 反握法对被焊件压力较大, 适用于较大功率电烙铁(一般大于 75W)的场合; 笔握法就像拿笔写字一样, 适用于小功率烙铁焊接印制电路板, 如图 14-13 所示。

焊锡丝一般有两种拿法, 如图 14-14 所示。由于焊锡丝中含有一定比例的铅, 而铅是对人体有害的一种重金属, 因此操作时应该戴手套或在操作后洗手, 避免食入铅尘。

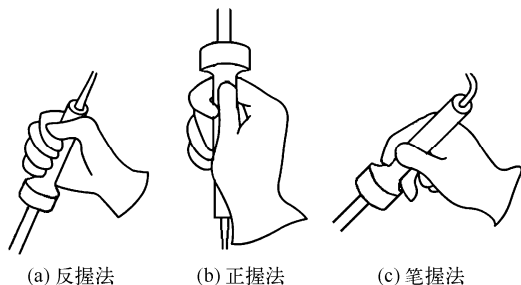


图 14-13 握电烙铁的手法示意

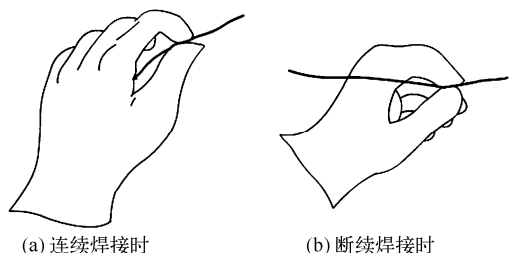


图 14-14 焊锡丝的拿法

电烙铁使用之后, 一定要稳妥地插放在烙铁架上, 并注意导线等其他杂物不要碰到烙铁头, 以免烫伤导线, 造成漏电事故。

#### 2. 电烙铁的合理使用

如果有条件, 选用恒温式电烙铁是比较理想的。对于一般科研、生产, 可以根据不同焊接对象选择不同功率的普通电烙铁, 通常就能够满足需要。表 14-11 提供了选择烙铁的依据, 可供参考。

表 14-11 选择烙铁的依据

焊接对象及工作性质	烙铁头温度 (℃)	选用烙铁
一般印制电路板、安装导线	300~400	20W 内热式、30W 外热式、恒温式
集成电路	300~400	20W 内热式、恒温式
焊片、电位器、2~8W 电阻、大电解电容器、大功率管	350~450	35~50W 内热式、恒温式, 50~75W 外热式
8W 以上大电阻、 $\phi 2\text{mm}$ 以上导线	400~550	100W 内热式、140~200W 外热式
汇流排、金属版等	500~630	300W 外热式
维修、调试一般电子设备		20W 内热式、恒温式、感应式、储能式、两用式

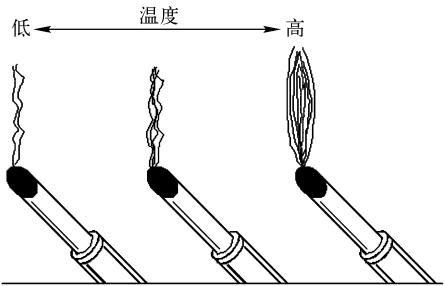


图 14-15 观察冒烟估计电烙铁温度

烙铁头温度的高低, 可以用热电偶或表面温度计测量, 也可以根据助焊剂的冒烟状态粗略地估计出来。如图 14-15 所示, 温度越低, 冒烟越小, 持续时间越长; 温度高则与此相反。当然, 对比的前提是在烙铁头上滴了等量的助焊剂。

实际工作中, 要根据情况灵活运用电烙铁。不要以为, 烙铁功率小就不会烫坏元器件。假如用一个小功率烙铁焊接大功率元器件, 因为烙铁的功率较小, 烙铁头同元器件接触以后不能提供足够的热量, 焊点达不到焊

接温度, 不得不延长烙铁头的停留时间。这样, 热量将传到整个器件上, 并使管芯温度可能达到损坏器件的程度。相反, 用较大功率的烙铁, 则能很快使焊点局部达到焊接温度, 不会使整个元器件承受长时间的高温, 反而不容易损坏元器件。

(1) 烙铁头的形状

烙铁头一般用紫铜制成, 现在内热式烙铁头都经过电镀。这种表面有镀层的烙铁头, 如果不是特殊需要, 一般不要用锉修整或打磨。因为电镀层的作用就是保护烙铁头不容易氧化生锈。

为了保证可靠方便地焊接, 必须合理选用烙铁头的形状和尺寸。选择烙铁头的依据是, 应使它尖端的接触面积小于焊接处(焊盘)的面积。烙铁头接触面过大, 会使过量的热量传导给焊接部位, 损坏元器件。一般来说, 烙铁头越长、越粗, 则温度越低, 需要焊接的时间越长; 反之, 烙铁头越短、越尖, 则温度越高, 焊接的时间越短。每个操作者可以根据自己的习惯选用烙铁头。有经验的电子装配工人手中都准备有几个不同形状的烙铁头, 以便根据焊接对象的变化和工作的需要随时选用。对于一般科研技术人员来说, 复合型烙铁头能够适应大多数情况。

图 14-16 是几种常用烙铁头的外形。其中, 圆斜面式是烙铁头的一般形式, 适于在单面板上焊接不太密集的焊点; 凿式和半凿式烙铁头多用于电气维修工作; 尖锥式和圆锥式烙铁头适合于焊接高密度的焊点和小而怕热的元件, 例如, 焊接 SMT 元器件; 当焊接对象变化大时, 可选用适合于大多数情况的斜面复合式烙铁头。

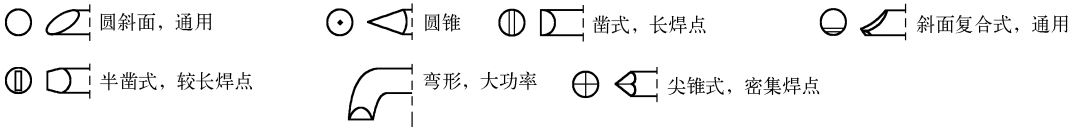


图 14-16 各种常用烙铁头的形状

(2) 烙铁头的修整与镀锡

按照规定, 电烙铁头应该经过渗镀铁镍合金, 使它具有较强的耐高温氧化性能, 但目前市售



的一般低档电烙铁的烙铁头大多只是在紫铜表面镀了一层锌合金。镀锌层虽然也有一定的保护作用，但在焊接时，烙铁头长期处于高温状态，又接触助焊剂等弱酸性物质，其表面很容易氧化腐蚀并沾上一层黑色杂质。这些杂质形成隔热层，妨碍了烙铁头与焊件之间的热传导。因此，要注意用一块湿布或湿的木质纤维海绵随时擦拭烙铁头。对于普通烙铁头，在腐蚀污染严重时可以使用锉刀修去表面氧化层。一般是将烙铁头拿下来，夹到台钳上用粗锉刀修整成自己要求的形状，然后再用细锉刀修平，最后用细砂纸打磨光。有经验的操作工人都会根据焊接对象的形状和焊点的密集程度，对烙铁头的形状和粗细进行修整。对于长寿命烙铁头，绝对不能使用这种方法。

修整过的烙铁头应该立即镀锡。方法是烙铁头装好后，在松香水中浸一下，再拿出来；然后接通烙铁电源，待烙铁热后，在木板上放些松香并放一段焊锡，烙铁头沾上锡，在松香中来回磨擦；直到整个烙铁头的修整面均匀镀上一层焊锡为止。也可以在烙铁头沾上锡后，在湿布上反复磨擦。

应该记住，新的电烙铁通电以前，一定要先浸松香水，否则烙铁头表面会生成难以镀锡的氧化层。

### (3) 电烙铁的灵活使用

一般的非专业焊接工，手头不可能有各种规格的烙铁。在不太大的范围内，用一把烙铁可以对付不同要求的焊接点，关键在于烙铁头的灵活选择。烙铁头与温度的关系是：烙铁头越长，温度越低；烙铁头越粗，温度越低。当然，反之则是温度高了。这里所说的温度，是指连续焊接时烙铁尖的温度。

修整多次后变短的烙铁头，可在需要高温烙铁时用以代替功率较大的烙铁。为了热量集中，可以把它修得细一些。如果手头只有一把大功率电烙铁，但需要焊接细小的或热容量小的焊点，可以用图 14-17 所示的办法，它相当于一把小功率烙铁。

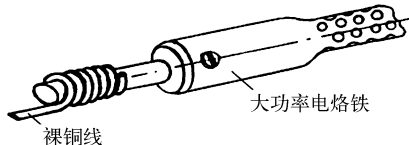


图 14-17 用裸铜丝缠接成烙铁焊头

### 3. 手工焊接工序

在长期生产实践中，人们总结出的焊接操作的三要素：清洁处理、加热、焊接。在焊接中只要其中有一项不符合要求，就会导致产品质量下降。围绕“三要素”，根据不同的焊接对象，则有不同的操作方法，下面介绍使用带有焊剂芯的焊锡丝进行焊接的五步骤操作方法，如图 14-18 所示。

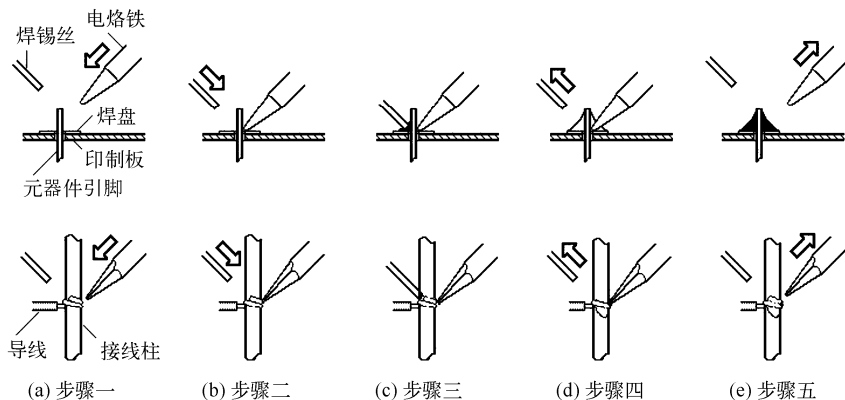


图 14-18 锡焊五步操作法

#### (1) 准备施焊

焊接前必须做好焊接的准备工作，它包括焊接部位的清洁处理、预焊、元器件引线的成形及插装、焊接工具及焊接材料的准备，使连接点处于随时可以焊接的状态。左手拿焊丝，右手握烙铁，进入备焊状态（见图 14-18（a））。要求烙铁头保持干净，无焊渣等氧化物，并在表面镀有一层焊锡。

## (2) 加热焊件

烙铁头靠在两焊件的连接处, 加热整个焊件全体, 时间大约为  $1\sim 2\text{s}$  (见图 14-18 (b))。对于在印制板上焊接元器件来说, 要注意使烙铁头同时接触两个被焊接物。例如, 图 14-18 (b) 中的导线与接线柱、元器件引线与焊盘要同时均匀受热。如果烙铁头接触角度或接触部位不恰当, 会导致热传导速度某一侧快, 另外一侧慢, 使得几种金属不能同时加热, 由于加热不均匀将影响焊点的质量。

加热时, 不要采用烙铁对焊件增加压力的办法, 以免造成损坏或不易觉察的隐患。有些初学者用烙铁头对焊接面施加压力, 企图加快焊接, 这是不对的。正确的方法是, 要根据焊件的形状选用不同的烙铁头, 或者自己修整烙铁头, 让烙铁头与焊件形成面的接触而不是点或线的接触。这样, 就能大大提高传热效率。

在非流水线作业中, 焊接的焊点形状是多种多样的, 不大可能不断更换烙铁头。要提高加热的效率, 需要有进行热量传递的焊锡桥。所谓焊锡桥, 就是靠烙铁头上保留少量焊锡, 作为加热时烙铁头与焊件之间传热的桥梁。由于金属熔液的导热效率远远高于空气, 使焊件很快就被加热到焊接温度。应该注意, 作为焊锡桥的锡量不可保留过多, 不仅因为长时间存留在烙铁头上的焊料处于过热状态, 实际已经降低了质量, 还可能造成焊点之间误连短路。

## (3) 送入焊丝

焊件的焊接面被加热到一定温度时, 焊锡丝从烙铁对面接触焊件 (见图 14-18 (c))。注意: 不要把焊锡丝送到烙铁头上! 焊料量的多少, 应使导线的外形保持可见或保证能够覆盖连接点。在施焊过程中, 要求操作者针对不同的焊接对象, 掌握正确的焊接时间。

手工焊接常用的管状焊锡丝, 内部已经装有由松香和活化剂制成的助焊剂。焊锡丝的直径有  $0.5\text{mm}$ 、 $0.8\text{mm}$ 、 $1.0\text{mm}$ 、 $\cdots$ 、 $5.0\text{mm}$  等多种规格, 要根据焊点的大小选用。一般应使焊锡丝的直径略小于焊盘的直径。

如图 14-19 所示, 过量的焊锡不但无必要地消耗了焊锡, 而且还增加焊接时间, 降低工作速度。更为严重的是, 过量的焊锡很容易造成不易觉察的短路故障。焊锡过少也不能形成牢固的结合, 同样是不利的。特别是焊接印制板引出导线时, 焊锡用量不足, 极易造成导线脱落。

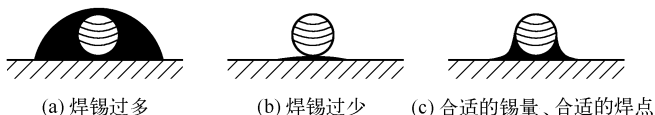


图 14-19 焊点锡量的掌握

## (4) 移开焊丝

当焊丝熔化一定量后, 立即向左上  $45^\circ$  方向移开焊丝 (见图 14-18 (d))。

## (5) 移开烙铁

焊锡浸润焊盘和焊件的施焊部位以后, 向右上  $45^\circ$  方向移开烙铁, 结束焊接 (见图 14-18 (e))。从第三步开始到第五步结束, 时间是  $1\sim 2\text{s}$ 。

烙铁头的主要作用是加热, 待焊料熔化后, 应迅速撤离焊接点, 过早或过晚撤离均易造成焊点的质量问题。烙铁头的另一个作用是可控制焊料量及带走多余的焊料, 这与烙铁头撤离的方向有关。

烙铁头从斜上方约  $45^\circ$  角的方向离开焊点, 可使焊点圆滑, 带走少量焊料; 若烙铁头垂直向上撤离, 容易造成焊点拉尖; 若烙铁沿水平方向撤离, 可带走大量焊料; 若烙铁头沿焊点向下撤离, 将带走大部分焊料; 若烙铁头沿焊点向上撤离, 仅带走少量焊料。图 14-20 所示为烙铁不同的撤离方向对焊点锡量的影响。掌握烙铁头撤离方向, 就能控制焊料量, 使每个焊点符合要求,

这是手工焊接的技巧之一。

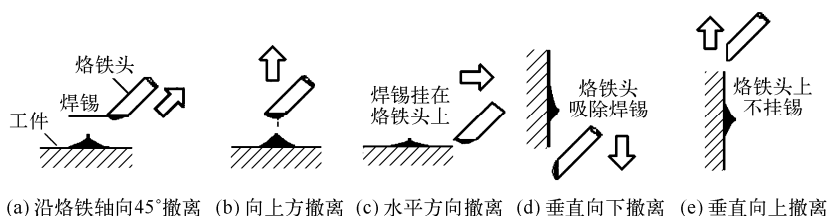


图 14-20 烙铁撤离方向和焊点锡量的关系

对于热容量小的焊件，例如，印制板上较细导线的连接，可以简化为三步操作。

(1) 准备 同上述“手工焊接工序”中的“准备拖焊”。

(2) 加热与送丝 烙铁头放在焊件上后即放入焊丝。

(3) 去丝移烙铁 焊锡在焊接面上浸润扩散达到预期范围后，立即拿开焊丝并移开烙铁，并注意移去焊丝的时间不得滞后于移开烙铁的时间。

对于吸收低热量的焊件而言，上述整个过程的时间不过 2~4s，各步骤的节奏控制，顺序的准确掌握，动作的熟练协调，都是要通过大量实践并用心体会才能做到的。有人总结出了在五步骤操作中用数秒的办法控制时间：烙铁接触焊点后数一、二（约 2s），送入焊丝后数三、四，移开烙铁，焊丝熔化量要靠观察决定。此办法可以参考，但由于烙铁功率、焊点热容量的差别等因素，实际掌握焊接火候并无定章可循，必须具体条件具体对待。

#### 4. 注意事项

##### (1) 焊接温度与加热时间

在介绍锡焊的机理和条件时，已经不止一次讲到，适当的温度对形成良好的焊点是必不可少的。这个温度究竟如何掌握呢？当然，根据有关数据，可以很清楚地查出不同的焊件材料所需要的最佳温度，得到有关曲线。但是，在一般的焊接过程中，不可能使用温度计之类的仪表来随时检测，而是希望用更直观明确的方法来了解焊件温度。

烙铁头在焊件上停留的时间与焊件温度的升高是正比关系。同样的烙铁，加热不同热容量的焊件时，想达到同样的焊接温度，可以通过控制加热时间来实现。但在实践中又不能仅依此关系决定加热时间。例如，用小功率烙铁加热较大的焊件时，无论烙铁停留的时间多长，焊件的温度也升不上去，原因是烙铁的供热容量小于焊件和烙铁在空气中散失的热量。此外，为防止内部过热损坏，有些元器件也不允许长期加热。

加热时间对焊件和焊点的影响及其外部特征是什么呢？如果加热时间不足，会使焊料不能充分浸润焊件，形成松香夹渣而虚焊。反之，过量的加热，除有可能造成元器件损坏以外，还有如下危害和外部特征：

① 焊点的外观变差。如果焊锡已经浸润焊件以后还继续进行过量的加热，将使助焊剂全部挥发，造成熔态焊锡过热，降低浸润性能；当烙铁离开时容易拉出锡尖，同时焊点表面发白，出现粗糙颗粒，失去光泽。

② 高温造成所加松香助焊剂的分解炭化。松香一般在 210℃ 开始分解，不仅失去助焊剂的作用，而且在焊点内形成炭渣而成为夹渣缺陷。如果在焊接过程中发现松香发黑，肯定是加热时间过长所致。

③ 过量的受热会破坏印制板上铜箔的黏合层，导致铜箔焊盘的剥落。因此，在适当的加热时间里，准确掌握加热火候是优质焊接的关键。

##### (2) 焊剂用量要适中

适量的助焊剂对焊接非常有利。过量使用松香焊剂，焊接以后势必需要擦除多余的焊剂，并且延长了加热时间，降低了工作效率。当加热时间不足时，又容易形成“夹渣”的缺陷。焊接开关、接插件的时候，过量的焊剂容易流到触点上，会造成接触不良。合适的焊剂量，应该是松香水仅能浸湿将要形成焊点的部位，不会透过印制板上的通孔流走。对使用松香芯焊丝的焊接来说，基本上不需要再涂助焊剂。目前，印制板生产厂在电路板出厂前大多进行过松香水喷涂处理，无须再加助焊剂。

### （3）不要使用烙铁头作为运送焊锡的工具

有人习惯到焊接面上进行焊接，结果造成焊料的氧化。因为烙铁尖的温度一般都在 300℃ 以上，焊锡丝中的助焊剂在高温时容易分解失效，焊锡也处于过热的低质量状态。

### （4）冷却和清洗

焊接时间结束之后，焊料和烙铁头都已撤离，焊点应自然冷却，不要用嘴吹或使用其他强制冷却的方法，以免影响焊点的形成。在焊料凝固过程中，连接点不应受到任何外力的影响而改变位置。特别是用镊子夹住焊件时，一定要等焊锡凝固后再移走镊子，否则极易造成焊点结构疏松或虚焊。

焊接完成之后，必须进行清洗，除去残留在焊点周围的焊剂、油污等，以防残留物的污染及腐蚀，并使焊点清洁美观。

## 14.2.4 焊点的质量及检查

对焊点的质量，其要求应该包括电气接触良好、机械结合牢固和美观三个方面。保证焊点质量最重要的一点，就是必须避免虚焊。

### 14.2.4.1 对焊点的要求

#### 1. 可靠的电气连接

焊接是电子线路从物理上实现电气连接的主要手段。锡焊连接不是靠压力，而是靠焊接过程形成的牢固连接的合金层达到电气连接的目的。如果焊锡仅仅是堆在焊件的表面或只有少部分形成合金层，也许在最初的测试和工作中不会发现焊点存在问题，但随着条件的改变和时间的推移，接触层氧化，脱离出现了，电路产生时通时断或者干脆不工作，而这时观察焊点外表，依然连接如初。这是电子设备工作中最头疼的问题，也是产品制造中必须十分重视的问题。

#### 2. 足够的机械强度

焊接不仅起到电气连接的作用，同时也是固定元器件、保证机械连接的手段。这就有个机械强度的问题。作为锡焊材料的铅锡合金，本身强度是比较低的，常用铅锡焊料抗拉强度约为  $3 \sim 4.7 \text{ kgf/cm}^2$  ( $0.3 \sim 0.46 \text{ MPa}$ )，只有普通钢材的 10%。要想增加强度，就要有足够的连接面积。如果是虚焊点，焊料仅仅堆在焊盘上，自然就谈不到强度了。另外，在元器件插装后把引线弯折，实行钩接、绞合、网绕后再焊，也是增加机械强度的有效措施。

造成强度较低的常见缺陷是因为焊锡未流满焊点或焊锡量过少，还可能因为焊接时焊料尚未凝固就发生振动而引起的焊点结晶粗大（像豆腐渣状）或有裂纹。

#### 3. 光洁整齐的外观

良好的焊点要求焊料用量恰到好处，表面圆润，有金属光泽。外表是焊接质量的反映，注意：焊点表面有金属光泽是焊接温度合适、生成合金层的标志，这不仅仅是美观的要求。

#### （1）普通焊点

在单面和双面（多层）印制电路板上，焊点的形成是有区别的：如图 14-21（a）所示，在单面板上，焊点仅形成在焊接面的焊盘上方；但在双面板或多层板上，熔融的焊料不仅浸润焊盘上

方, 还由于毛细作用, 渗透到金属化孔内, 焊点形成的区域包括焊接面的焊盘上方、金属化孔内和元件面上的部分焊盘, 如图 14-21 (b) 所示。

无论采用设备焊接还是手工焊接, 双面印制电路板中的焊料都可能通过金属化孔流向元件面: 在手工焊接的时候, 双面板的焊接面朝上, 熔融的焊料浸润焊盘后, 焊料会由于重力的作用沿着金属化孔流向元件面; 采用波峰焊的时候, 双面板的焊接面朝下, 喷涌的波峰压力和插线孔的毛细作用也会使焊料流向元件面。焊料凝固后, 孔内和元件面焊盘上的焊料有助于提高电气连接性能和机械强度。所以, 设计双面印制板的焊盘, 直径可以小一些, 从而可提高双面板的布线密度和装配密度。不过, 流到元件面的焊锡不能太多, 以免在元件面上造成短路。

如图 14-22 所示, 从外表直观看典型焊点, 对它的要求是:

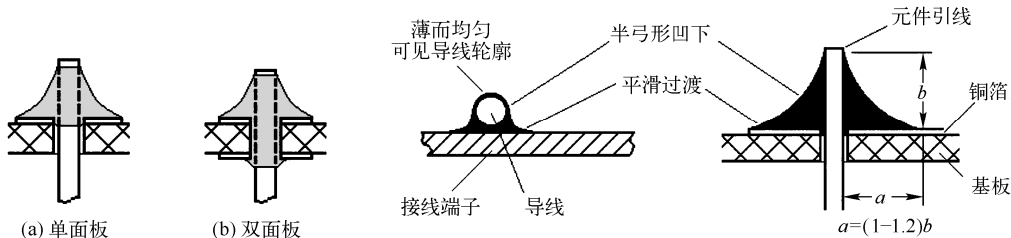


图 14-21 焊点的形成

图 14-22 典型焊点的外观

① 形状为近似圆锥而表面稍微凹陷, 呈漫坡状, 以焊接导线为中心, 对称成裙形展开。虚焊点的表面往往向外凸出, 可以鉴别出来。

② 焊点上, 焊料的连接面呈凹形自然过渡, 焊锡和焊件的交界处平滑, 接触角尽可能小。

③ 表面平滑, 有金属光泽。

④ 无裂纹、针孔、夹渣。

## (2) SMT 印制板上的焊点

焊接 SMT 元器件, 无论采用手工焊接, 还是采用波峰焊或再流焊设备进行焊接, 都希望得到可靠、美观的焊点。图 14-23 画出了 SMT 焊点的理想形状。其中, 图 (a) 是无引线 SMD 元件的焊点, 焊点主要产生在电极焊端外侧的焊盘上; 图 (b) 是翼形电极引脚器件 SO/SOL/QFP 的焊点, 焊点主要产生在电极引脚内侧的焊盘上; 图 (c) 是 J 形电极引脚器件 PLCC 的焊点, 焊点主要产生在电极引脚外侧的焊盘上。良好的焊点非常光亮, 其轮廓应该是微凹的漫坡形。

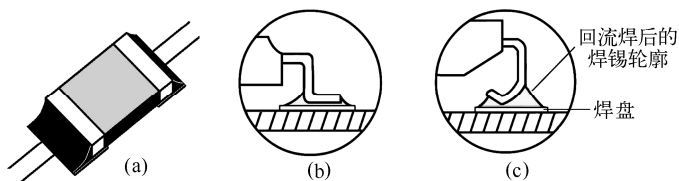


图 14-23 SMT 焊点的理想形状

### 14.2.4.2 焊点缺陷分析及其检查方法

#### 1. 常见焊点缺陷及其分析

造成焊接缺陷的原因很多, 在材料 (焊料与焊剂) 和工具 (烙铁、工装、夹具) 一定的情况下, 采用什么样的操作方法、操作者是否有责任心, 就是决定性的因素了。

#### (1) 虚焊产生的原因及其危害

虚焊主要是由待焊金属表面的氧化物和污垢造成的, 它使焊点成为有接触电阻的连接状态, 导

致电路工作不正常，出现连接时好时坏的不稳定现象，噪声增加而没有规律性，给电路的调试、使用和维护带来重大隐患。此外，也有一部分虚焊点在电路开始工作的一段较长时间内，保持接触尚好，因此不容易被发现。但在温度、湿度和振动等环境条件的作用下，接触表面逐步被氧化，接触慢慢地变得不完全起来。虚焊点的接触电阻会引起局部发热，局部温度升高又促使不完全接触的焊点情况进一步恶化，最终甚至使焊点脱落，电路完全不能正常工作。这一过程有时可长达一、二年，其原理可以用“原电池”的概念来解释：当焊点受潮使水汽渗入间隙后，水分子溶解金属氧化物和污垢形成电解液，虚焊点两侧的铜和铅锡焊料相当于原电池的两个电极，铅锡焊料失去电子被氧化，铜材获得电子被还原。在这样的原电池结构中，虚焊点内发生金属损耗性腐蚀，局部温度升高加剧了化学反应，机械振动让其中的间隙不断扩大，直到恶性循环使虚焊点最终形成断路。

统计数字表明，在电子整机产品的故障中，有将近一半是由于焊接不良引起的。然而，要从一台有成千上万个焊点的电子设备里，找出引起故障的虚焊点来，实在不是一件容易的事。所以，虚焊是电路可靠性的重大隐患，必须严格避免。进行手工焊接操作的时候，尤其要加以注意。

一般来说，造成虚焊的主要原因是：焊锡质量差；助焊剂的还原性不良或用量不够；被焊接处表面未预先清洁好，镀锡不牢；烙铁头的温度过高或过低，表面有氧化层；焊接时间掌握得不好，太长或太短；焊接中焊锡尚未凝固时，焊接元件松动。

(2) 印制板上各种焊点缺陷及分析

表 14-12 列出了印制电路板上各种焊点缺陷的外观、特点及危害，并分析了产生的原因；在接线端子上焊接导线时常见的缺陷如图 14-24 所示，供检查焊点时参考。

表 14-12 印制电路板上各种焊点缺陷及分析

焊点缺陷	外观特点	危害	原因分析
虚焊	焊锡与元器件引线和铜箔之间有明显黑色界限，焊锡向界限凹陷	不能正常工作	元器件引线未清洁好、未镀好锡或锡氧化；印制板未清洁好，喷涂的助焊剂质量不好
焊料堆积	焊点呈白色、无光泽，结构松散	机械强度不足，可能虚焊	焊料质量不好；焊接温度不够；焊接未凝固前元器件引线松动
焊料过多	焊点表面向外凸出	浪费焊料，可能包藏缺陷	焊丝撤离过迟
焊料过少	焊点面积小于焊盘的80%，焊料未形成平滑的过渡面	机械强度不足	焊锡流动性差或焊锡撤离过早；助焊剂不足；焊接时间太短
松香焊	焊缝中夹有松香渣	强度不足，导通不良，可能时通时断	助焊剂过多或已失效；焊接时间不够，加热不足；焊件表面有氧化膜
过热	焊点发白，表面较粗糙，无金属光泽	焊盘强度降低，容易剥落	烙铁功率过大，加热时间过长
冷焊	表面呈豆腐渣状颗粒，可能有裂纹	强度低，导电性能不好	焊料未凝固前焊件抖动
浸润不良	焊料与焊件交界面接触过大，不平滑	强度低，不通或时通时断	焊件未清理干净；助焊剂不足或质量差；焊件未充分加热
不对称	焊锡未流满焊盘	强度不足	焊料流动性差；助焊剂不足或质量差；加热不足
松动	导线或元器件引线可移动	不导通或导通不良	焊锡未凝固前引线移动造成间隙；引线未处理好（不浸润或浸润差）
拉尖	焊点出现尖端	外观不佳，容易造成桥接短路	助焊剂过少而加热时间过长；烙铁撤离角度不当
桥接	相邻导线连接	电气短路	焊锡过多；烙铁撤离角度不当
针孔	目测或低倍放大镜可见焊点有孔	强度不足，焊点容易腐蚀	引线与焊盘孔的间隙过大
气泡	引线根部有喷火式焊料隆起，内部藏有空洞	暂时导通，但长时间容易引起导通不良	引线与焊盘孔间隙大；引线浸润性不良；双面板堵通孔焊接时间长，孔内空气膨胀
铜箔翘起	铜箔从印制板上剥离	印制板已被损坏	焊接时间太长，温度过高
剥离	焊点从铜箔上剥落（不是铜箔与印制板剥离）	断路	焊盘上金属镀层不良

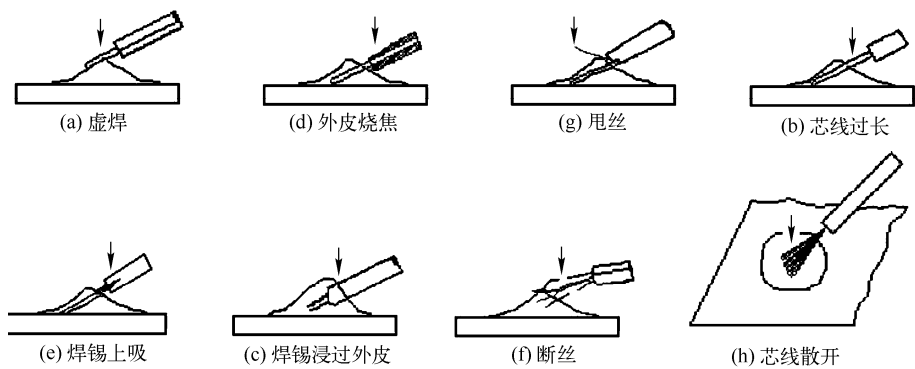


图 14-24 导线端子焊接缺陷示例

2. 焊点检查

焊点的外观检查，除用目测（或借助放大镜，显微镜观测）焊点是否合乎上述标准以外，还包括从以下几个方面对整块印制电路板进行焊接质量的检查：没有漏焊；没有焊料拉尖；没有焊料引起导线间短路（即所谓“桥接”）；不损伤导线及元器件的绝缘层；没有焊料飞溅。检查时，还要用指触、镊子拨动、拉线等办法检查有无导线断线、焊盘剥离等缺陷。

在外观检查结束以后，认为连线无误，才可进行通电检查，这是检验电路性能的关键。如果不经严格的外观检查，通电检查不仅困难较多，而且可能损坏仪器设备，造成事故。通电检查可以发现许多微小的缺陷，

例如，用目测观察不到的电路桥接，但对于内部虚焊的隐患就不容易觉察。所以根本的问题还是要提高焊接操作的工艺和技术水平，不能把焊接问题留给检验工序去完成。

通电检查焊接质量的结果及原因分析如表 14-13 所示。

表 14-13 通电检查焊接质量的结果及原因分析

通电检查结果		原因分析
元器件损坏	失效	过热损坏、烙铁漏电
	性能降低	烙铁漏电
导通不良	短路	桥接、焊料飞溅
	断路	焊锡开裂、松香夹渣、虚焊、插座接触不良等
	时通时断	导线断丝、焊盘剥落等

14.3 印制板插装焊接技术

由于印制电路板具有许多独特的优点而在整机结构中被大量地采用，因此，在当前电子设备组装中，印制电路板的组装是整机组装的关键环节。通常我们把不装载元件的印制电路板叫做印制基板，它的主要作用是作为元器件的支撑体，利用基板上的印制线路，通过焊接把元器件连接起来。同时它还有利于板上元器件的散热。

印制基板的元件面安装元器件。元件的引出线在焊接面的焊盘处通过焊接把线路连接起来。电子元器件种类繁多，外形不同，引出线也多种多样，所以，印制板的组装方法必须根据产品结构的特点、装配密度以及产品的使用方法、要求来决定。元器件装配到基板之前，一般都要进行加工处理，然后进行插装。良好的成形及插装工艺，不仅能使机器性能稳定，而且还能获得机内整齐、美观的效果。

## 14.3.1 元器件的安装

### 14.3.1.1 印制电路板组装工艺流程

#### 1. 手工方式

(1) 在产品的样机试制阶段或小批量试生产时,印制板装配主要靠手工操作,即操作者把分散的元器件逐个装接到印制基板上。这种操作方式,每个操作者要从头装到结束,效率低,而且容易出差错。

(2) 对于设计稳定、大批量生产的产品,印制板装配工作量大,宜采用流水线装配,这种方式可大大提高生产效率、减少差错、提高产品合格率。

流水操作是把一次复杂的工作分成若干道简单的工序,每个操作者在规定的时间内,完成指定的工作量(一般限定每人约6个元器件插装的工作量)。在划分时要注意每道工序所用的时间要相等,这个时间就称为流水线的节拍。装配的印制板在流水线上的移动,一般都是用传送带的运动方式进行。运动方式通常有两种:一是间歇运动(即定时运动),另一种是连续匀速运动,每个操作者必须严格按照规定的节拍进行。一种印制板的操作和工序的划分,要根据其复杂程度、日产量或班产量及操作者人数等因素确定。

引线切割一般用专用设备——割头机,一次切割完成,锡焊通常用波峰焊机完成。

目前大多数电子设备(如电视机等)的生产大都采用印制线路板插件流水线的方式。插件形式有自由节拍形式和强制节拍形式两种。自由节拍形式分手工操作和半自动化操作两种类型。手工操作时,操作者按规定插件、剪切引线、焊接,然后在流水线上传递。半自动化操作时,生产线上配备着具有铲头功能的插件台,每个操作者一台,印制板插装完成后,传送到波峰焊机上。

采用强制节拍形式时,插件板在流水线上连续运行,每个操作者必须在规定的时间内把所要求插装的元器件准确无误地插到线路板上。这种方式带有一定的强制性。在选择分配每个工位的工作量时,要留有适当的余地,以便既能保证一定的劳动生产率,又能保证产品质量。这种流水方式,工作内容简单,动作单纯,可减少差错、提高工效。

#### 2. 自动装配工艺流程

手工装配虽然可以不受各种限制,灵活方便而广泛应用于各道工序,但速度慢,易出差错,效率低,不适应现代化大批量生产的需要,尤其是对于设计稳定、产量大和装配工作量大而元器件又无须选配的产品,宜采用自动装配方式。自动装配一般使用自动或半自动插件机和自动定位机等设备。先进的装配机每小时可装一万多个元器件,效率高,节省劳力,产品合格率也大大提高。

自动装配和手工装配的过程基本上是一样的,通常都是从印制基板上逐一添装元器件,构成一个完整的印制线路板,所不同的是,自动装配要求限定元器件的供料形式,整个插装过程由自动装配机完成。

(1) 经过处理的元器件装在专用的传输带上,间断地向前移动,保证每次只有一个元器件进到自动装配机里,插装机自动完成切断引线、引线成形、插入、弯角等动作,并发出插装完了的信号,使所有装配回到原来位置,准备装配第二个元件。印制板靠传送带自动送到另一个装配工位,装配其他元器件,当元器件全部插装完毕,即自动进入波峰焊接的传送带。

印制电路板的自动传送、插装、焊接、检测等工序,都是用电子计算机进行程序控制。它首先根据印制板的尺寸、孔距、元器件尺寸和它在板上的相对位置等,确定可插装元器件和选定装配的最好途径、编写程序,然后再把这些程序送入编程机的存储器中,由计算机自动控制完成上述工艺流程。



(2) 自动装配工艺对元器件的要求：采用标准元器件和尺寸。对于被装配的元器件，要求它们的形状和尺寸尽量一致，有互换性等，有些元器件，虽然手工装配时有容易固定等优点，但自动装配却很困难，而双列直插式集成电路却适用于自动装配。另外，还有一个元器件的取向问题，即元器件在印制板什么方向取向，对手工装配没有什么限制，也没有什么根本差别。但在自动装配中，则要求沿着 x 轴或 y 轴取向，最佳设计要指定所有元器件只在一个轴上取向。为希望机器达到最大的有效插装速度，就要有一个最好的元器件排列。元器件的引线孔距和相邻元器件引线之间的距离，也都应标准化，并尽量相同。

### 14.3.1.2 元器件引线的成形

#### 1. 预加工处理

元器件引线在成形前必须进行加工处理。这是由于元器件引线的可焊性虽然在制造时就有这方面的技术要求，但因生产工艺的限制，加上包装、储存和运输等中间环节时间较长，在引线表面产生氧化膜，使引线的可焊性严重下降。引线的再处理主要包括引线的校直、表面清洁及搪锡三个步骤，要求引线处理后，没有伤痕，镀锡层均匀，表面光滑，无毛刺和焊剂残留物。

#### 2. 引线成形的基本要求

引线成形工艺就是根据焊点之间的距离，做成需要的形状。目的是使它能迅速而准确地插入孔内，基本要求如下：

- (1) 元件引线开始弯曲处，离元件端面的最小距离应不小于 2mm。
- (2) 弯曲半径不应小于引线直径的两倍。
- (3) 怕热元件要求引线增长，成形时应绕环。
- (4) 元件标称值应处在便于查看的位置。
- (5) 成形后不允许有机械损伤。

#### 3. 成形方法

为保证引线成形的质量和一致性，应使用专用工具和成形模具。成形工序因生产方式不同而不同。在自动化程度高的工厂，成形工序是在流水线上自动完成的，如采用电动、气动等专用引线成形机，可以大大提高效率和一致性。在没有专用工具或加工少量元器件时，可采用手工成形，使用鸭嘴钳或镊子等一般工具。为保障成形工艺，可自制一些成形机械，以提高手工操作能力。

有些元器件的引脚需要修剪成形，集成器件引脚较多，装配时不易插入。为此，先将引脚按顺序剪成梯形状，能够在装配中按顺序对孔插入，如图 14-25 所示。

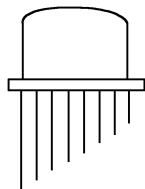


图 14-25 多引脚修剪成形

### 14.3.1.3 元器件安装的要求和方法

#### 1. 元器件安装的技术要求

(1) 元器件的标志方向应按照图纸规定的要求，安装后能看清元件上的标志。若装配图上没有指明方向，则应使标记向外易于辨认，并按从下到上的顺序读出。

(2) 安装元器件的极性不得装错。为了区别晶体管的电极和电解电容的正负端，一般是在安装时，加带有颜色的套管以示区别。

安装二极管时，除注意极性外，还要注意外壳封装，特别是玻璃壳体易碎，引线弯曲时

易爆裂,在安装时可将引线先绕1~2圈再装。对于大电流二极管,有的则将引线体当做散热器,故必须根据二极管规格中的要求决定引线的长度,也不宜把引线套上绝缘套管。

(3) 安装顺序一般为先轻后重、先易后难、先一般元器件后特殊元器件。

(4) 分布应均匀,疏密一致,排列整齐美观。不允许斜排、立体交叉和重叠排列。元器件外壳和引线不得相碰,要保证1mm左右的安全间隙,无法避免时,应套绝缘套管。

(5) 元器件的引线直径与印刷板焊盘孔径应留有0.2~0.4mm的合理间隙。

(6) MOS集成电路的安装应在等电位工作台上进行,以免静电损坏器件。发热元件(如2W以上的电阻)要与印刷板面保持一定的距离,不允许贴板安装,较大元器件的安装(重量超过28g)应采取绑扎、黏固等措施。

(7) 元器件插好后,有弯头的,要根据要求处理好,所有弯脚的弯折方向都应与铜箔走线方向相同。

(8) 大功率三极管一般不宜装在印制板上,因为它发热量大,易使印制板受热变形。

## 2. 元器件安装方法

安装方法有手工安装和机械安装。前者简单易行,但效率低、误装率高;而后者安装速度快,误装率低,但设备成本高。引线成形要求严格。

安装形式一般有以下几种:

(1) 贴板安装 其安装形式如图14-26所示,它适用于防振要求高的产品。元器件贴紧印制基板面,安装间隙小于1mm。当元器件为金属外壳,安装面又有印制导线时,应加垫绝缘衬垫或套绝缘套管。

(2) 悬空安装 其安装形式如图14-27所示。它适用于发热元件的安装。元器件距印制基板面有一定高度,安装距离一般在3~8mm范围内。

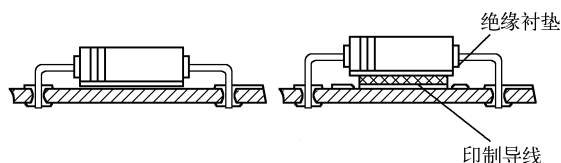


图 14-26 贴板安装

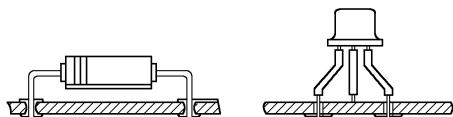


图 14-27 悬空安装

(3) 垂直安装 元器件垂直于印制基板面,如图14-28所示。这种形式适用于安装密度较高的场合。但对大质量、细引线的元器件不宜采用这种形式。

(4) 埋头安装 其安装形式如图14-29所示。这种方式可提高元器件的防振能力,降低安装高度。元器件的壳体埋于印制基板的嵌入孔内,因此又称为嵌入式安装。

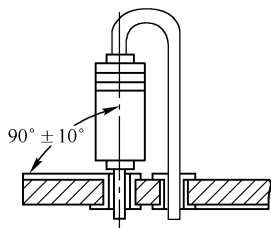


图 14-28 垂直安装

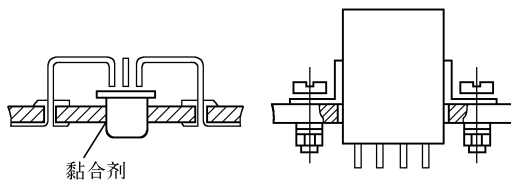


图 14-29 埋头安装

(5) 有高度限制时的安装 其安装形式如图14-30所示。元器件安装高度的限制一般在图纸上是标明的,通常处理的方法是垂直插入后,再朝水平方向弯曲。对大型元器件要特殊处理,以

保证有足够的机械强度，经得起振动和冲击。

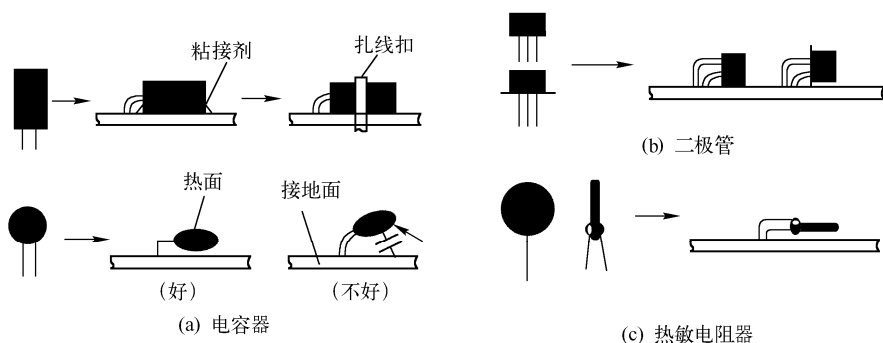


图 14-30 有高度限制时的安装

(6) 支架固定安装 其安装形式如图 14-31 所示。这种方式适用于重量较大的元件，如小型继电器、变压器、阻流圈等，一般用金属支架在印制板上将元件固定。

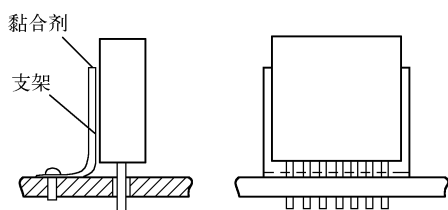


图 14-31 支架固定安装

## 14.3.2 印制电路板手工焊接技术

印制电路板手工焊接的主要特点是操作要准而快，一般在焊接操作时电烙铁选用 20W 内热式或温度控制电烙铁。

### 14.3.2.1 一般焊接要求

印制电路板组装的目的是要按照设计的要求将各类电子元器件安装、焊接在基板上。具体来说就是：完成元器件和焊盘的电气互连；在组装工艺全过程中均不允许对元器件的性能造成损伤；组装工艺能满足组装件的各项性能，包括可靠性的要求，例如，焊点能承受热疲劳和机械疲劳试验不失效，在潮热、寿命试验中不产生特性变化和电迁移现象等。

对于单面印制线路板，元器件不能装在印制导线的一面，否则不合格。对于双面印制板金属化孔的焊接，可采用单面焊接方法，使焊料在孔内部分润湿，并流向另一侧，也可采用两面焊接。但要充分加热，使孔内气体排出，否则焊料未填满，不合格，如图 14-32 所示。图 (a) 合格（孔的两面有焊料），图 (b) 不合格（焊料未填满）。

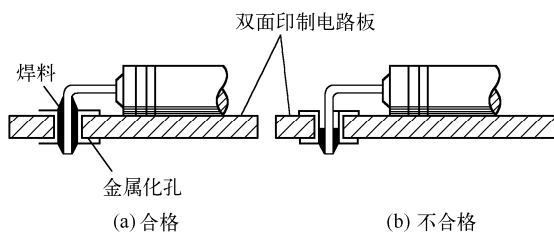


图 14-32 双面印制电路板焊接图

多层印制线路板的焊接禁止采用两面焊接，以防止金属化孔内出现焊接不良，造成多层印制电路板内层电气连接开路或接触不良，焊接按图 14-33 的要求进行。

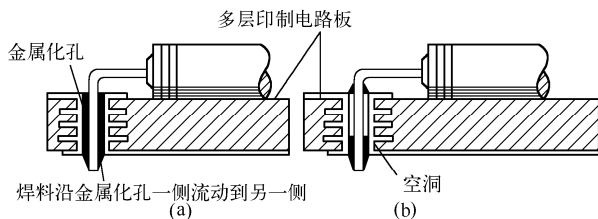


图 14-33 多层印制电路板焊接图

扁平引线（如扁平封装集成电路）的焊接，要求引线对位正确。若元器件引线在印制电路板上需打弯后焊接，引线应向印制导线的方向打弯。

#### 14.3.2.2 特殊元件的焊接

##### 1. 有机注塑元件的焊接

现在，大量的各种有机材料广泛地应用在电子元器件、零部件的制造中。这些材料包括有机玻璃、聚氯乙烯、聚乙烯、酚醛树脂等。通过注塑工艺，它们可以被制成各种形状复杂、结构精密的开关和插接件等，成本低、精度高、使用方便；但其最大弱点是不能承受高温。在对这类元件的电气接点施焊时，如果不注意控制加热时间，极易造成有机材料的热塑性变形，导致零件失效或降低性能，造成故障隐患。图 14-34 是钮子开关结构示意图以及由于焊接技术不当造成失效的例子。

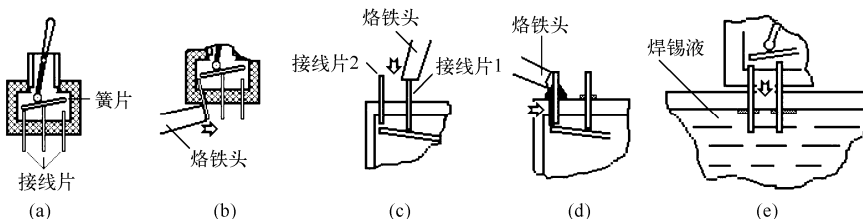


图 14-34 钮子开关结构以及焊接不当导致失效的例子示意图

##### (1) 图 14-34 中所示例子的失效原因

- ① 图 (b) 为施焊时侧向加力，造成接线片变形，导致开关不通。
- ② 图 (c) 为焊接时垂直施力，使接线片 1 垂直位移，造成闭合时接线片 2 不能导通。
- ③ 图 (d) 为焊接时加焊剂过多，沿接线片浸润到接点上，造成接点绝缘或接触电阻过大。
- ④ 图 (e) 为镀锡时间过长，造成开关下部塑壳软化，接线片因自重移位，簧片无法接通。

##### (2) 正确的焊接方法

- ① 在元件预处理时尽量清理好接点，一次镀锡成功，特别是将元件放在锡锅中浸镀时，更要掌握好浸入深度及时间。
  - ② 焊接时，烙铁头要修整得尖一些，以便在焊接时不碰到相邻接点。
  - ③ 非必要时，尽量不使用助焊剂；必须添加时，要尽可能少用助焊剂，以防止浸入机电元件的接触点。
  - ④ 烙铁头在任何方向上均不要对接线片施加压力，避免接线片变形。
  - ⑤ 在保证润湿的情况下，焊接时间越短越好。焊接后，不要在塑壳冷却前对焊点进行牢固性试验。
- ##### 2. 焊接簧片类元件的接点

这类元件如继电器、波段开关等，其特点是在制造时给接触簧片施加了预应力，使之产生适当的弹力，保证电接触的性能。安装焊接过程中，不能对簧片施加过大的外力和热量，以免破坏接触点的弹力，造成元件失效。所以，簧片类元件的焊接要领是：可焊性预处理；加热时间要短；

不可对焊点任何方向加力；焊锡用量宜少而不宜多。

### 14.3.2.3 特殊电路单元的装焊

#### 1. MOSFET 及集成电路的焊接

在电子设备中除常规的电子装配、焊接外，由于电路特性的需要，还有一些特殊的电路单元的焊接需要格外谨慎。对这些特殊电路单元的装焊在工艺上应有特别要求，这样才能保证整机的产品质量。MOSFET，特别是绝缘栅型场效应器件，由于输入阻抗很高，如果不按规定程序操作，很可能使内部电路击穿而失效。

双极型集成电路不像 MOS 集成电路那样娇气，但由于内部集成度高，通常管子的隔离层都很薄，一旦受到过量的热也容易损坏。无论哪种电路都不能承受高于 200℃ 的温度，焊接这类器件时应该注意下述几点：

(1) 引线如果采用镀金处理或已经镀锡的，可以直接焊接。不要用刀刮引线，最多只需要用酒精擦洗或用绘图橡皮擦干净就可以了。

(2) 对于 CMOS 电路，如果事先已将各引线短路，焊前不要拿掉短路线，对使用的电烙铁，最好采用防静电措施。

(3) 在保证浸润的前提下，尽可能缩短焊接时间，一般不要超过 2s。

(4) 注意保证电烙铁良好接地。必要时，还要采取人体接地的措施（佩戴防静电腕带、穿防静电工作鞋）。

(5) 使用低熔点的焊料，熔点一般不要高于 180℃。

(6) 工作台上如果铺有橡胶、塑料等易于积累静电的材料，则器件及印制板等不宜放在台面上，以免静电损伤。工作台最好铺上防静电胶垫。

(7) 使用电烙铁，内热式的功率不超过 20W，外热式的功率不超过 30W，且烙铁头应该尖一些，防止焊接一个端点时碰到相邻端点。

(8) 若不使用插座将集成电路直接焊到印制板上，安全焊接的顺序是：地端→输出端→电源端→输入端。

#### 2. 高频电路单元的装焊要求

(1) 若是镀银件，要戴白细纱手套进行操作，以免汗渍腐蚀，使镀银层发黑。

(2) 组件与导线的相互连线应尽量短，一般为直拉装焊。

(3) 采用镀银裸线做短连线时，线径应比一般单元的短接线线径要粗些，以减少高频损耗。

(4) 短接线尽量不加或少加绝缘套管，以免增加介质损耗。如果需要绝缘则必须采用介质损耗小的绝缘导线或高频屏蔽线、同轴电缆线。

(5) 为减小高频电路单元中导线间的耦合，布线时应注意导线间尽量不要平行放置，更不允许将高频导线扎成线扎。如导线必须交叉时，应尽可能成 90° 交叉。

(6) 提高导线的刚性。细而长的导线刚性较差。在冲击和振动下，很容易变形和移动，结果引起电容、电感耦合的变化，使高频电路参量不稳定而影响电路正常工作。

(7) 高频系统中的紧固支撑零件最好不加金属件；采用的绝缘材料应该是介电常数和介质损耗小的，如高频陶瓷或环氧玻璃布层压绝缘板等。

#### 3. 高压电路单元的装焊要求

(1) 根据高压的不同值来确定元器件间的相互距离，一般来说应尽可能大，以免产生打火或电弧。

- (2) 组件引脚的导线要弯成圆弧形, 不允许弯成直角或锐角, 以免尖端放电。
- (3) 采用相应的耐高压导线和耐高压套管对高压引出的端子进行处理。
- (4) 所有高压部分的焊点要尽量圆滑, 绝不允许出现拉尖或毛刺存在。
- (5) 要求较高或电压很高的高压电路单元, 应用有机硅凝胶将其整体进行灌封。

#### 4. 高温电路单元的装焊要求

- (1) 导线或线束不允许贴靠发热器件, 如电源变压器、大功率管、散热片、大瓦数的电阻等。
- (2) 元器件和怕热器件, 应尽可能远离发热器件和热敏组件, 以免温升过高而引起参数变化或损坏。
- (3) 大功率的电阻距离板面应有一定的间隔, 不允许贴板安装。

### 14.3.3 印制板自动焊接技术

#### 14.3.3.1 浸焊工艺

浸焊是将插装好元器件的印制板浸入锡锅内一次完成所有焊点焊接的一种方法。这是一种最早的群焊工艺。浸焊在开始阶段是手工操作、效率不高, 后来发展为能沿着导轨自动进入锡锅的焊接技术。浸焊比手工焊接操作简单, 生产效率高, 所需设备简单, 适用于批量生产。但焊接质量不如手工焊及下面要介绍的波峰焊, 补焊率较高(约 20%左右), 并容易产生虚焊和焊锡浪费大等缺点。

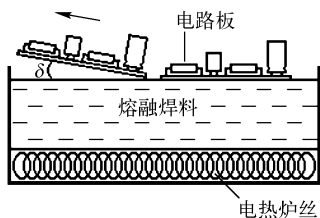


图 14-35 浸焊设备的焊锡槽示意图

##### 1. 浸焊过程

浸焊最早应用在电子设备的批量生产中, 浸焊设备的焊锡槽如图 14-35 所示。将装好元器件的印制板装上专用夹具, 印制板沿导轨以  $14^\circ$  倾角进锡锅内, 锡铅焊料的温度控制在  $250^\circ\text{C}$  左右, 经过锡锅的时间约 3s, 然后以  $14^\circ$  倾角离开。

浸焊设备的工作原理是让插好元器件的印制电路板水平接触熔融的铅锡焊料, 使整块电路板上的全部元器件同时完成焊接。印制板上的导线被阻焊层阻隔, 不需要焊接的焊点和部位, 要用特制的阻焊膜(或胶布)贴住, 防止焊锡不必要的堆积。浸焊设备价格低廉, 有些小型企业现在还在使用, 有经验的操作者同样可以保证焊接的质量。

操作浸焊机, 应该注意以下几点:

- (1) 锡锅的温度应控制在所要求的范围之内, 不能过高或过低。过低, 焊锡流动性差, 并有印制板浸润不均匀的缺点; 过高, 容易使印制板铜箔翘起。一开始要选择快速加热, 当焊料熔化后, 改用保温挡进行小功率加热, 以防止由于温度过高加速焊料氧化, 既保证浸焊质量, 也节省了电力消耗。
- (2) 焊接前, 让电路板浸蘸助焊剂, 应该保证助焊剂均匀涂敷到焊接面的各处。有条件的, 最好使用发泡装置, 有利于助焊剂涂敷。
- (3) 根据焊料使用消耗的情况, 及时补充焊料。
- (4) 印制板浸入前, 必须用一带绝缘把手的铅片, 把浮渣刮干净。
- (5) 对未安装元器件的安装孔, 要贴上胶带, 以避免焊锡填入。
- (6) 浸焊时要防止焊锡飞溅, 操作时必须佩戴防护用品。

##### 2. 浸焊机的种类

常用的浸焊机有两种: 一种是普通浸焊机; 另一种是超声波浸焊机。

(1) 普通浸焊机 它是在锡锅的基础上增加滚动装置和温度调节装置构成的。先将待焊工件浸蘸助焊剂，再浸入浸焊机的锡槽。由于槽内焊料在持续加热的作用下不停滚动，改善了焊接效果。

(2) 超声波浸焊机 它是通过向锡锅内辐射超声波来增强浸锡效果的，适于一般浸锡较困难的元器件焊接。超声波浸焊机一般由超声波发生器、换能器、水箱、焊料槽、加温设备等几部分组成。有些浸焊机还配有带振动头的夹持印制板专用装置，振动装置使电路板在浸锡时振动，让焊料能与焊接面更好地接触浸润。带振动头的超声波浸焊机在焊接双面印制电路板时，能使焊料浸润到焊点的金属化孔里，使焊点更加牢固，还能振动掉粘在板上的多余焊料。

### 14.3.3.2 波峰焊工艺

这项工艺采用特殊的胶粘剂，将表面安装元件粘贴在印制电路板规定的位置上，待烘干后进行波峰焊接，这种方法一般适用于混合安装的场合。在焊接时，由于焊点上无插线孔，因而在高温汽化时所产生的大量焊剂蒸汽无法排放，很容易产生“锡爆”，造成漏焊、桥接等缺陷。为了解决这一问题，采用空心波或双峰焊接。空心波是一种高速喷射的圆弧状的中空波峰，有较大的上冲力，有利于克服元件的遮蔽效应，减少漏焊和桥接。

#### 1. 波峰焊的工作原理

波峰焊机是在浸焊机基础上发展起来的自动焊接设备，两者最主要的区别在于设备的焊锡槽。波峰焊是利用焊锡槽内的机械式或电磁式离心泵，将熔融焊料压向喷嘴，形成一股向上平稳喷涌的焊料波峰，并源源不断地从喷嘴中溢出。装有元器件的印制电路板以直线平面运动的方式通过焊料波峰，在焊接面上形成浸润焊点而完成焊接。图 14-36 是波峰焊机的焊锡槽示意图。

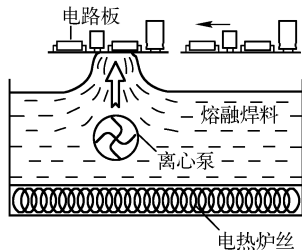


图 14-36 波峰焊机焊锡槽示意图

现在，波峰焊设备已经国产化，波峰焊成为应用最普遍的一种焊接印制电路板的工艺方法。这种方法适宜大批量地焊接一面装有分立元件和集成电路的印制线路板。凡与焊接质量有关的重要因素，如焊料与焊剂的化学成分、焊接温度、速度、时间等，在波峰焊机上均能得到比较完善的控制。图 14-37 是一般波峰焊机的内部结构示意图。

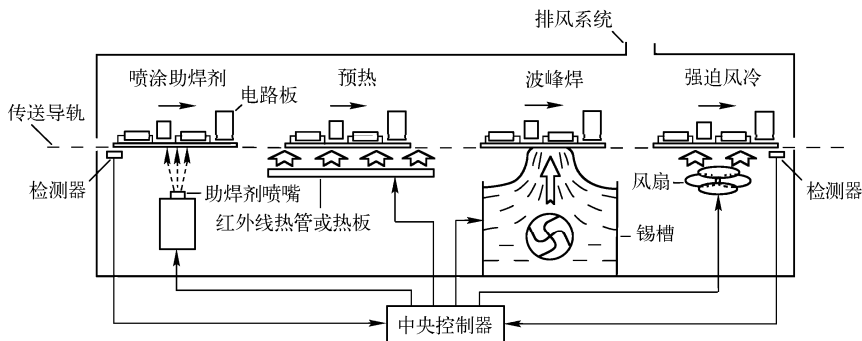


图 14-37 波峰焊机的内部结构示意图

将已完成插件工序的印制板放在匀速运动的导轨上，导轨下面有装有机泵和喷口的熔锡槽。根据焊接要求，机械泵连续不断地泵出平稳的液态锡波，焊锡熔液通过喷口，以波峰形式溢出至焊接板面进行焊接。为了获得良好的焊接质量，焊接前应做好充分的准备工作，如预镀焊锡、涂敷助焊剂、预热等；焊接后的冷却、清洗等操作也都要做好。

波峰焊机的焊料液在锡槽内始终处于流动状态,使工作区域内的焊料表面无氧化层。由于印制板和波峰之间处于相对运动状态,所以助焊剂容易挥发,焊点内不会出现气泡。印制板在波峰区的滞留时间由焊料波与印制板的焊接面之间接触区域的宽度来决定,同时也与印制板传动速度有关;锡波到达顶点后,就沿喷射室外边的一个面或两个面回落,流回到焊料储存槽中。

波峰焊接的生产能力,以工件直线输出的速度表示,其值在 60~300cm/min 范围内。

#### (1) 完成助焊剂喷涂到 PCB 上的助焊剂槽及喷嘴

助焊剂必须形成又细又密的泡沫物与 PCB 接触,均匀地涂覆在 PCB 焊接面上,因此发泡管及喷射嘴不得有堵塞现象,气压要足够。为达到良好的效果,助焊剂必须密度适宜,固体含量低(3%左右),且无水分,否则将影响焊接。

在波峰焊机的制造中,设计了各种喷嘴,每种喷嘴都能产生特殊的波形,就其波峰形状有 Z 波、T 波、双 T 波等多种,波峰焊机的型号与品种有时就以波形来区分。

#### (2) 预热板

使沾了助焊剂的线路板快速加热使水份蒸发并减少线路板上锡时的温差,同时可避免零件因温度提升过快而损坏,防止线路板突然受热而变形;其次是使松香能发挥最佳的助焊效果。为保证预热效果,预热板必须表面光洁以保持其热传导性,保证预热效果。

#### (3) 锡槽

锡槽是完成焊接最关键的组成部分,通过蜗轮转动在密室内形成一股强动力将锡喷上锡槽并形成波峰状。前部波峰瀑布状的锡波通过快速移动刷掉因“遮蔽效应”而滞留在 PCB 焊锡面的助焊剂,让锡能够完全可靠地润湿 PCB 焊点,其仰冲的最佳角度为 5°,以便让后部的平稳锡波进一步修整已被润湿但形状不规整的焊点,使之完美。

要求锡槽保持清洁,定时将氧化物等杂质清走,保持锡槽周围及输送带爪的清洁,锡槽定期放锡,重新整理保持锡波平稳。电动机定期加润滑油,锡槽的高度要合适,不让锡泵超负荷运行且尽量缩小旋转速度减小锡波荡漾并保护发热管。

#### (4) 输送带

输送带是完成焊接过程的机械化装置。它让焊接过程机械化、标准化。焊锡对输送带的技术要求:链条必须定期加润滑油,以保证输送带运行平稳、无颤动,输送带爪保持清洁,避免将杂质及其他物质带入锡槽污染焊锡。

### 2. 波峰焊的工艺流程

波峰焊生产线可根据设备和场地布置成直线式或循环式。工艺流程应包括准备、装件、敷焊剂、预热、烘干、波峰焊接、冷却、铲头、清洗和装卸工件等工序。

#### (1) 准备工序

包括元器件引线成形及印制电路板的准备等。与手工焊接相比,对印制板的要求更高,以适应波峰焊的要求。

#### (2) 装件工序

一般采用流水作业的方法插装元器件,即将加工成形的元器件分成若干工位,插装到印制电路板上。插装方式可分为手工插装、半自动插装和全自动插装。手工插装时,操作工人把本工位所要插装的元器件准确无误地插到印制电路板上,然后传送至下一个工位。半自动插装时,生产线上配备多台半自动摇装机,每个操作工人独用一台,完成全部元器件的插装,然后送到波峰焊机焊接。全自动插装是通过计算机程序控制的插装机,由机械手完成元器件的插装。

#### (3) 涂焊剂工序



为了提高被焊表面的润湿性和去除氧化物,需要在印制板焊接面喷涂一层焊剂。发泡焊剂喷涂方式是最常用的方式;其工作原理如下:不锈钢制成的焊剂槽中,安装一根多微孔型发泡瓷管,槽内盛有助焊剂,压缩空气通过气压调节器,送入多孔瓷管时,在气压的作用下,从瓷管微孔处不断产生焊剂泡沫,经喷嘴溢出,形成泡沫波峰,印制板通过时,被均匀喷涂上一层焊剂;焊剂的泡沫波峰高度通常在 10~20mm,可通过压缩空气流量进行调整。焊剂密度要定期检查,以防焊剂中溶剂挥发而变浓,影响发泡性和焊接质量。

#### (4) 预热工序

为使印制板上的助焊剂加热到活化点,必须预热。同时预热还能减小印制板焊接时的热冲击,防止板面变形。预热的形式主要有热辐射式和热风式两种。辐射热源有管状加热器、远红外硅板加热器和铸铁板加热器。管状加热器结构简单,清理方便,但热惯性小;远红外加热器热效率高,节能,但清洗不方便;铸铁板加热器温度均匀,热惯性大,但结构笨重。

热风式加热器,预热温度均匀,温度变化小,但预热温度较低,一般由不锈钢皮制成箱体,上加百叶窗口,箱体底部安装一个小风扇,中间安装加热器。当风扇叶片转动时,空气通过加热器后形成热气流,经百叶窗口对插件进行预加热,温度一段控制在 40~50℃。

#### (5) 焊接工序

印制板进入波峰区时,印制板与焊料波峰作相对运动。板面受到一定的压力,焊料润湿引线 and 焊盘。热风式加热器波峰焊嘴是波峰焊机中的关键部件,其质量好坏直接影响焊料波的平稳度。因此要求喷嘴的几何形状要正确,符合加工精度技术要求。制作时采用机械成形,严禁敲打成形。波峰焊质量与焊机工作时的工艺参数密切相关,最佳工艺参数的选定和调整,是保证焊接质量的关键。

#### (6) 冷却工序

印制电路板焊接后,板面温度仍然很高,此时焊点处于半凝固状态,稍微受到冲击和振动都会影响焊接点的质量。另外,高温时间太长,也会影响元器件的质量。因此,焊接后,必须进行冷却处理,一般采用风扇冷却。

#### (7) 清洗工序

波峰焊接完成之后,对板面残留的焊剂等污物,要及时清洗,否则在焊点检查时,不易发现渣孔、虚焊、气泡等缺陷,残留的助焊剂还会造成对插件板的侵蚀。清洗方法有多种,现在使用较普遍的方法有液相清洗法和汽相清洗法两种。不论采用哪种清洗方法,都要求清洗材料只对焊剂的残留物有较强的溶解能力和去污能力,而对焊接点无腐蚀作用。为保证焊接点的质量,不允许采用机械方法去刮掉焊接点上的焊剂残渣或污物。

### 3. 波峰焊机的类型

在采用一般的波峰焊机焊接 SMT 电路板时,有两个技术难点:在焊接过程中,助焊剂或 SMT 元器件的粘贴剂受热分解所产生的气泡不易排出,遮蔽在焊点上,可能造成焊料无法接触焊接面而形成漏焊。印制板在焊料熔液的波峰上通过时,较高的 SMT 元器件对它后面或相邻的较矮的 SMT 元器件周围的死角产生阻挡,形成阴影区,使焊料无法在焊接面上漫流而导致漏焊或焊接不良。

为克服这些 SMT 焊接缺陷,除了采用再流焊等焊接方法以外,已经研制出许多新型或改进型的波峰焊设备,有效地排除了原有的缺陷,创造出空心波、组合空心波、紊乱波、旋转波等新的波峰形式。新型的波峰焊机按波峰形式分类,可以分为单峰、双峰、三峰和复合峰四种波峰焊机。

#### (1) 斜坡式波峰焊机

斜坡式波峰焊机和一般波峰焊机的区别,在于传送导轨以一定角度的斜坡方式安装,如图 14-38 (a) 所示。这样做的好处是,增加了电路板焊接面与焊锡波峰接触的长度。假如电路板以

同样速度通过波峰,等效增加了焊点浸润的时间,从而可以提高传送导轨的运行速度和焊接效率;不仅有利于焊点内的助焊剂挥发,避免形成夹气焊点,还能让多余的焊锡流下来。

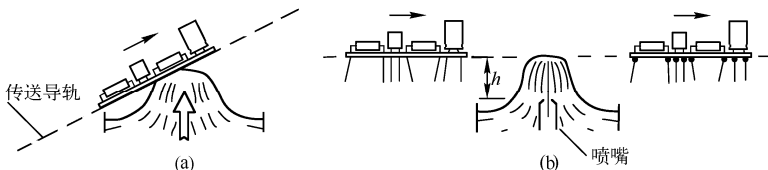


图 14-38 斜坡式波峰焊机和高波峰焊机

### (2) 高波峰焊机

高波峰焊机适用于 THT 元器件“长脚插焊”工艺,它的焊锡槽及其锡波喷嘴如图 14-38 (b) 所示。其特点是焊料离心泵功率比较大,从喷嘴中喷出的锡波高度比较高,并且其高度  $h$  可以调节,保证元器件的引脚从锡波里顺利通过。一般在高波峰焊机的后面配置剪腿机,用来剪短元器件的引脚。

### (3) 双波峰焊机

双波峰焊机是 SMT 时代发展起来的改进型波峰焊设备,特别适合焊接那些 THT+SMT 混合元器件的电路板。双波峰焊机的焊料波形如图 14-39 所示,使用这种设备焊接印制电路板时,THT 元器件要采用“短脚插焊”工艺。电路板的焊接面要经过两个熔融的铅锡焊料形成的波峰:这两个焊料波峰的形式不同,最常见的波型组合是“紊流波”+“宽平波”;“空心波”+“宽平波”的波形组合也比较常见;焊料熔液的温度、波峰的高度和形状、电路板通过波峰的时间和速度这些工艺参数,都可以通过计算机伺服控制系统进行调整。

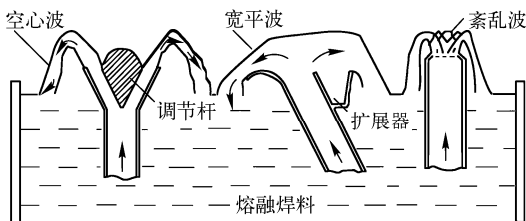


图 14-39 双波峰焊机的焊料波型

① 空心波。顾名思义,空心波的特点是在熔融铅锡焊料的喷嘴出口设置了指针形调节杆,让焊料熔液从喷嘴两边对称的窄缝中均匀地喷流出来,使两个波峰的中部形成一个空心的区域,并且两边焊料熔液喷流的方向相反。由于空心波的伯努利效应 (Bernoulli Effect, 一种流体动力学效应), 它的波峰不会将元器件推离基板,相反使元器件贴向基板。空心波的波型结构,可以从不同方向消除元器件的阴影效应,有极强的填充死角、消除桥接的效果。它能够焊接 SMT 元器件和引线元器件混合装配的印制电路板,特别适合焊接极小的元器件,即使是在焊盘间距为 0.2mm 的高密度 PCB 上,也不会产生桥接。空心波焊料熔液喷流形成的波柱薄、截面积小,使 PCB 基板与焊料熔液的接触面减小,不仅有利于助焊剂热分解气体的排放,克服了气体遮蔽效应,还减少了印制板吸收的热量,降低了元器件损坏的概率。

② 紊流波。在双波峰焊接机中,用一块多孔的平板去替换空心波喷口的指针形调节杆,就可以获得由若干小子波构成的紊流波。看起来像平面涌泉似的紊流波,也能很好地克服一般波峰焊的遮蔽效应和阴影效应。

③ 宽平波。在焊料的喷嘴出口处安装了扩展器,熔融的铅锡熔液从倾斜的喷嘴喷流出来,形成偏向宽平波 (也叫片波)。逆着印制板前进方向的宽平波的流速较大,对电路板有很好的擦洗作用;在设置扩展器的一侧,熔液的波面宽而平,流速较小,使焊接对象可以获得较好的后热

效应，起到修整焊接面、消除桥接与拉尖、丰满焊点轮廓的效果。

④ 选择性波峰焊设备。近年来，SMT 元器件的使用率不断上升，在某些混合装配的电子设备里甚至已经占到 95%左右，按照以往的思路，对电路板 A 面（也称“元件面”）进行再流焊、B 面（也称“焊接面”）进行波峰焊的方案已经面临挑战。在以集成电路为主的产品中，很难保证在 B 面上只贴装耐受温度的 SMC（Surface Mounting Component）元件、而不贴装承受高温能力较差的 SMD——集成电路，由此可能因波峰焊导致 SMD 被损坏；假如用手工焊接的办法对少量 THT 元件实施焊接，又感觉一致性难以保证。为此，厂商推出了选择性波峰焊设备。这种设备的工作原理是：在根据电路板设计文件所编制的程序控制下，小型波峰焊锡槽和喷嘴移动到电路板需要补焊的位置，顺序、定量喷涂助焊剂并喷涌焊料波峰，进行局部焊接。

4. 波峰焊工艺材料的调整

在波峰焊机工作的过程中，焊料和助焊剂被不断消耗，需要经常对这些焊接材料进行监测与调整。

(1) 焊料

波峰焊一般采用 Sn63/Pb37 的共晶焊料，熔点为 183℃。Sn 的含量应该保持在 61.5%以上，并且 Sn/Pb 两者的含量比例误差不得超过±1%，主要金属杂质的最大含量范围见表 14-14。

表 14-14 波峰焊焊料中主要金属杂质的最大含量范围（%）

金属杂质	铜 Cu	铝 Al	铁 Fe	铋 Bi	锌 Zn	锑 Sb	砷 As
最大含量范围	0.8	0.05	0.2	1	0.02	0.2	0.5

应该根据设备的使用情况，每隔三个月到半年定期检测焊料的 Sn/Pb 比例和主要金属杂质含量。如果不符合要求，可以更换焊料或采取其他措施。例如，当 Sn 的含量低于标准时，可以添加纯 Sn 以保证含量比例。

(2) 助焊剂

波峰焊使用的助焊剂，要求表面张力小，扩展率>85%；黏度小于熔融焊料，容易被置换。一般助焊剂的密度在 0.82~0.84g/ml，可以用相应的溶剂来稀释调整，以便焊接后容易清洗。假如采用免清洗助焊剂，要求密度<0.8g/ml，不含卤化物，焊接后残留物少，不产生腐蚀作用，绝缘性好，绝缘电阻值大于  $1 \times 10^{11} \Omega$ 。

应该根据电子设备对清洁度和电性能的要求选择助焊剂的类型：卫星、飞机仪表、潜艇通信、微弱信号测试仪器等军用、航空航天产品或生命保障类医疗装置，必须采用免清洗助焊剂；通信设施、工业装置、办公设备、计算机等，可以采用免清洗助焊剂，也可以用清洗型助焊剂，焊接后进行清洗；一般，对要求不高的消费类电子设备，可以采用中等活性的松香助焊剂，焊接后不必清洗，当然也可以使用免清洗助焊剂。

(3) 焊料添加剂

在波峰焊的焊料中，还要根据需要添加或补充一些辅料，如抗氧化剂等。抗氧化剂的添加，可减少高温焊接时焊料的氧化，既可以节约焊料，又能提高焊接质量。抗氧化剂由油类与还原剂组成，其还原能力强，在焊接温度下不会碳化。锡渣减除剂的添加，能让熔融的铅锡焊料与锡渣分离，起到防止锡渣混入焊点、节省焊料的作用。

5. 工艺参数

波峰焊质量与焊机工作时的工艺参数密切相关。工艺参数受多种因素的影响和支配，它不仅由给定的机器型号所决定，而且也取决于被焊产品的设计。机器的试运转和误差的设定，意味着对每一种新产品都必须对机器重新进行调整。

(1) 预热温度

预热温度，指印制板喷涂焊剂后，进行波峰焊之前的预先加热温度。目的是使焊剂事先受热，促使焊剂能在正常活化温度下持续足够的时间，发挥最佳效能，以减少焊点的虚焊、拉尖和桥接等缺陷。同时，也减少焊料波峰对基板的热冲击，解决焊接中印制板翘曲变形问题。理想的双波峰焊的焊接温度曲线如图 14-40 所示。从图中可以看出，整个焊接过程被分为三个温度区域：预热、焊接、冷却。实际的焊接温度曲线可以通过编程对设备的控制系统进行调整。

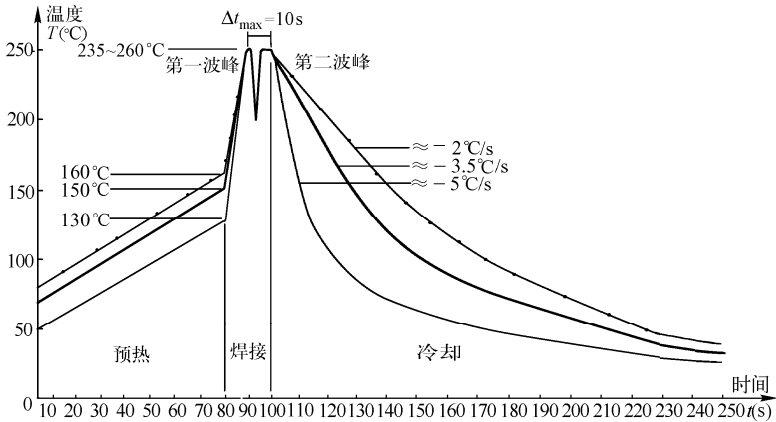


图 14-40 理想的双波峰焊的焊接温度曲线

在预热区内，电路板上喷涂的助焊剂中的溶剂被挥发，可以减少焊接时产生气体。同时，松香和活化剂开始分解活化，去除焊接面上的氧化层和其他污染物，并且防止金属表面在高温下再次氧化。印制电路板和元器件被充分预热，可以有效地避免焊接时急剧升温产生的热应力损坏。电路板的预热温度及时间，要根据印制板的大小、厚度、元器件的尺寸和数量，以及贴装元器件的多少来确定。在 PCB 表面

表 14-15 不同印制电路板在波峰焊时的预热温度

PCB 类型	元器件种类	预热温度 (°C)
单面板	THC+SMD	90~100
双面板	THC	90~110
双面板	THC+SMD	100~110
多层板	THC	110~125
多层板	THC+SMD	110~130

测量的预热温度应该在 90~130°C 之间，多层板或贴片元器件较多时，预热温度取上限。预热时间由传送带的速度来控制。如果预热温度偏低或预热时间过短，助焊剂中的溶剂挥发不充分，焊接时就会产生气体引起气孔、锡珠等焊接缺陷；如预热温度偏高或预热时间过长，焊剂被提前分解，使焊剂失去活性，同样会引起毛刺、桥接等焊接缺陷。为恰当控制预热温度和时间，以达到最佳的预热温度，可以参考表 14-15 内的数据，也可以从波峰焊前涂覆在 PCB 底面的助焊剂是否有黏性来进行判断。

(2) 焊接温度

一般是指喷嘴出口处焊料的温度。焊接过程是焊接金属表面、熔融焊料和空气等之间相互作用的复杂过程，同样必须控制好焊接温度和时间。若焊接温度偏低，液体焊料的黏性大，不能很好地在金属表面浸润和扩散，就容易产生拉尖和桥接、焊点表面粗糙等缺陷；如焊接温度过高，容易损坏元器件，还会由于焊剂被碳化失去活性、焊点氧化速度加快，产生焊点发乌、不饱满等问题。测量波峰表面温度，一般应该在 250°C±5°C 的范围之内。因为热量、温度是时间的函数，在一定温度下，焊点和元件的受热量随时间而增加。波峰焊的焊接时间可以通过调整传送系统的速度来控制，传送带的速度，要根据不同波峰焊机的长度、预热温度、焊接温度等因素统筹考虑，进行调整。以每个焊点接触波峰的时间来表示焊接时间，一般焊接时间约为 3~4s。

### (3) 波峰宽度

波峰宽度,指焊件移动方向上波峰的有效行程的距离。它的宽窄直接反映了波峰焊接装置的容量。若波峰宽度较宽,可以允许有更快的传递速度让焊件通过波峰区。它决定了焊接的效率,但将影响整个装置的体积,一般在 40mm 左右。

### (4) 焊接速度

焊接速度,指焊件每分钟通过波峰的距离。焊接速度一般都是可调的。要想提高波峰焊机的工作效率,首先要提高工件传送速度。但速度受焊接时间的约束,只有加宽波峰宽度,加大锡槽容量和面积,提高泵的转速和功率,加宽喷嘴,才能提高焊锡的溢出能力。它们之间的关系可用下式表示

$$\text{焊接速度} = \text{波峰宽度} / \text{焊接时间} \quad (\text{m/min}) \quad (14-1)$$

### (5) 焊接角度(传送角度)

焊接角度,指印制板(焊件)通过波峰的倾斜角度。为了改善焊点质量,减少焊点的拉尖和桥接等毛病,要选择最佳角度。角越大对改善焊点质量越有利,但它又受到其他因素的约束,调节时需要互相配合。实际生产中,对于不同类型的波峰焊机,其最佳角度都是在试用中进行调整确定的。

综合调整控制工艺参数,对提高波峰焊的质量非常重要。焊接温度和时间,是形成良好焊点的首要条件。焊接温度和时间,与预热温度、焊料波峰的温度、导轨的倾斜角度、传输速度都有关系。双波峰焊的第一波峰一般调整为 $(235 \sim 240)^\circ\text{C}/1\text{s}$ ,第二波峰一般设置在 $(240 \sim 260)^\circ\text{C}/3\text{s}$ 。

## 14.4 印制板表面安装技术

表面安装技术 SMT 是近年来迅速发展的一种新的装联技术,即高密度装联技术。它是将表面安装形式的元器件,用专用的胶粘剂或焊料膏固定在制作好的印制电路板上,并在元器件的安装面实现安装。它打破了传统的“通孔”装配技术(THT),不是在基板上打孔插装元器件,而是用贴装机或手工的方式,直接将元器件贴装在印制板或陶瓷型基板上;因而 SMT 技术也可以说就是一种电子元器件贴焊工艺技术。

### 14.4.1 概述

#### 14.4.1.1 SMT 的特点和现状

##### 1. SMT 的特点

SMT 是将特殊的小型化了的表面安装元件(SMC)和器件(SMD)直接贴附并焊接在印制电路板上。表面安装元器件的特点是无引线(带有焊盘)或引线极短。因而它与传统的通孔元件的装配、焊接截然不同。表面安装技术有如下一些特点:

(1) 可以大大地提高印制电路板的安装密度,更有效地利用空间,使设备进一步小型化、多功能化。与通孔安装技术相比,节约印制板的空间 60%~70%,减轻重量 70%~90%。

(2) 能够减少安装工序,提高生产效率。SMT 的采用,可省去传统安装工艺中的印制板的钻孔工序、元器件成形工序以及有关的加工准备工作,因而可大大提高生产效率,并降低生产成本。

(3) 可以提高印制电路板的可靠性,改善电路特性、尤其是高频电路特性。表面安装元件无引线或引线短,使电路的信号路径短,分布参数大大减小,因而能显著改善电路的高频性能。同时这种装配结构的抗振动、抗冲击能力较强,使设备的可靠性也得到提高。

(4) 可以有效地实行自动化生产。采用自动贴装机进行生产与使用自动插装机的不同是,它不仅不需要加大印制面积,而且还可以提高元件安装密度及自动化的程度,使整个 SMT 程序都可以自动进行。

## 2. SMT 的发展现状

1971 年荷兰菲利普公司首先揭开 SMT 的序幕,将它用于石英电子表、计算器等超小型产品的生产。现在则正以迅猛发展之势渗透到电子工业生产的各个领域。电子整机应用 SMT 最多的是计算机,其次是通信、军用、消费类电子设备。新型个人通信能通过人造卫星实现全球通信,它有多种服务功能,没有 SMT 技术是做不出来的。军用电子装备也是 SMT 的用武之地,1998 年美国德州公司在机载军用计算机中采用了超高速集成电路(VHSIC)和多层陶瓷基板 SMT 技术。

当前,在世界范围内,SMD 正逐步取代通孔装联技术,而成为元器件的主要封装形式。SMT 的发展趋势及特征如下:

(1) 主要电子元器件除了向更高的表面安装化率发展之外,近年来的主要技术动向是元器件的小型薄型化、多功能化、全面表面安装化、复合化。例如,表面滤波器、陶瓷发射振子、拨动开关等器件的表面安装化带动了全部电子元器件的表面安装化,使 SMT 的应用范围扩大到整个电子设备领域,大大促进了 SMT 的腾飞。

(2) 印制电路板为适应电子设备的轻、薄、短、小化,围绕导体图形细线化、辅助孔小径化、柔性化、高密度表面安装化和放热对策等方面进行了大量的研究开发工作。印制板技术发展趋势为高密度化和多层化。

(3) 近年来特别引人瞩目的是多引线、细间隙的迅速发展,并且越来越多地用于各类工业电子设备,特别是高可靠性军事电子装备。

(4) SMD 安装后焊接的可靠性,是确保印制板组件性能的关键,所以,表面安装焊接的可靠性是 SMT 的重要研究课题。再流焊是 SMD 的主要焊接工艺,由于 SMD 封装形式的多样化,也要求有多样化的焊接方式与之对应,以充分发挥各种焊接方式的长处,改善表面安装印制板组件的焊接可靠性。因此,世界各国特别重视对各种焊接方式的焊接工艺研究。

### 14.4.1.2 SMT 元器件

#### 1. 对 SMT 元器件的基本要求

表面安装元器件应该满足以下基本要求:

##### (1) 装配适应性

要适应各种设备装配操作和工艺流程。

① SMT 元器件在焊接前要用贴装机贴放到电路板上,所以,元器件的上表面应该适用于真空吸嘴的拾取。

② 表面组装元器件的下表面(不包括焊端)应保留使用胶粘剂的能力。

③ 尺寸、形状应该标准化,并具有良好的尺寸精度和互换性。

④ 包装形式适应贴装机的自动贴装。

⑤ 具有一定的机械强度,能承受贴装应力和电路基板的弯曲应力。

##### (2) 焊接适应性

要适应各种焊接设备及相关工艺流程。

① 元器件的焊端或引脚的共面性好,适应焊接条件。

② 可以承受焊接后采用有机溶剂进行清洗,封装材料及表面标识不得被溶解。

#### 2. SMT 元器件的特点

表面安装元器件也称作贴片式元器件或片状元器件,它有两个显著的特点:

(1) 在 SMT 元器件的电极上,有些焊端完全没有引线,有些只有非常短小的引线;相邻电

极之间的距离比传统的双列直插式集成电路的引线间距（2.54mm）小很多，目前引脚中心间距最小的已经达到 0.3mm。在集成度相同的情况下，SMT 元器件的体积比传统的元器件小很多，或者说，与同样体积的传统电路芯片比较，SMT 元器件的集成度提高了很多倍。

（2）SMT 元器件直接贴装在印制电路板的表面，将电极焊接在与元器件同一面的焊盘上。这样，印制板上的通孔只起到电路连通导线的作用，孔的直径仅由制作印制电路板时金属化孔的工艺水平决定，通孔的周围没有焊盘，使印制电路板的布线密度大大提高。

3. SMT 元器件的种类和规格

表面安装元器件基本上都是片状结构。这里所说的片状是个广义的概念，从结构形状来说，包括薄片矩形、圆柱形、扁平异形等。表面安装元器件同传统元器件一样，也可以从功能上分类为无源元件（SMC）、有源器件（SMD）和机电元件三大类。表面安装元器件的详细分类见表 14-16。

表 14-16 SMT 元器件的分类

类 别	封 装 形 式	种 类
无源表面安装元件 SMC	矩形片式	厚膜和薄膜电阻器、热敏电阻、压敏电阻、单层或多层陶瓷电容器、钽电解电容器、片式电感器、磁珠等
	圆柱形	炭膜电阻器、金属膜电阻器、陶瓷电容器、热敏电容器、陶瓷晶体等
	异形	电位器、微调电位器、铝电解电容器、微调电容器、线绕电感器、晶体振荡器、变压器等
	复合片式	电阻网络、电容网络、滤波器等
有源表面安装器件 SMD	圆柱形	二极管
	陶瓷组件（扁平）	无引脚陶瓷芯片载体 LCCC、有引脚陶瓷芯片载体 CBGA
	塑料组件（扁平）	SOT、SOP、SOJ、PLCC、QFP、BGA、CSP 等
机电元件	异形	继电器、开关、连接器、延迟器、薄型微电动机等

表面安装元器件按照使用环境分类，可分为非气密性封装器件和气密性封装器件。非气密性封装器件对工作温度的要求一般为 0~70℃；气密性封装器件的工作温度范围可达到 -55~+125℃。气密性器件价格昂贵，一般使用在高可靠性产品中。

片状元器件最重要的特点是小型化和标准化。已经制定了统一标准，对片状元器件的外形尺寸、结构与电极形状等都做出了规定，这对于表面安装技术的发展无疑具有重要的意义。

4. 无源元件 SMC

SMC 包括片状电阻器、电容器、电感器、滤波器和陶瓷振荡器等。应该说，随着 SMT 技术的发展，几乎全部传统电子元件的每个品种都已经被“SMT 化”了。

如图 14-41 所示，SMC 的典型形状是一个矩形六面体（长方体），也有一部分 SMC 采用圆柱体的形状，这对于利用传统元件的制造设备、减少固定资产投入很有利。还有一些元件由于矩形化比较困难，就采用异形 SMC。

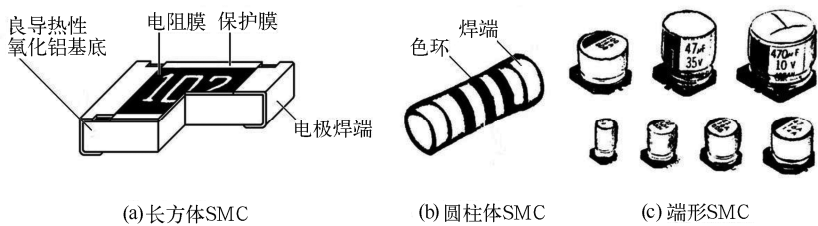


图 14-41 SMC 的基本外形

从电子元件的功能特性来说，SMC 特性参数的数值系列与传统元件的差别不大。长方体 SMC 是根据其外形尺寸的大小划分成几个系列型号的，现有两种表示方法，欧美产品大多采用英制系列，日本产品大多采用公制系列，我国还没有统一标准，两种系列都可以使用。无论哪种系列，系列型号的

前两位数字表示元件的长度，后两位数字表示元件的宽度。例如，公制系列 3216（英制 1206）的矩形贴片元件，长  $L=3.2\text{mm}$ （0.12 英寸），宽  $W=1.6\text{mm}$ （0.06 英寸）。并且，系列型号的发展变化也反映了 SMC 元件的小型化进程：5750（2220）→4532（1812）→3225（1210）→3216（1206）→2520（1008）→2012（0805）→1408（0603）→1005（0402）→0603（0201）。典型 SMC 系列的外形尺寸见表 14-17。

表 14-17 典型 SMC 系列的外形尺寸（单位：mm/英寸）

公制/英制型号	$L$	$W$	$A$	$b$	$T$
3214/1206	3.2/0.12	1.6/0.06	0.5/0.02	0.5/0.02	0.6/0.024
2012/0805	2.0/0.08	1.25/0.05	0.4/0.014	0.4/0.014	0.6/0.014
1408/0603	1.6/0.06	0.8/0.03	0.3/0.012	0.3/0.012	0.45/0.018
1005/0402	1.0/0.04	0.5/0.02	0.2/0.008	0.25/0.01	0.35/0.014
0603/0201	0.6/0.02	0.3/0.01	0.2/0.005	0.2/0.006	0.25/0.01

SMC 的元件种类用型号加后缀的方法表示，例如，3216C 是 3216 系列的电容器，2012R 表示 2012 系列的电阻器。

1408、1005、0603 系列 SMC 元件的表面积太小，难以用手工装配焊接，所以元件表面不印刷它的标称数值（参数印在纸编带的盘上）；3216、2012 系列片状 SMC 的标称数值一般用印在元件表面上的三位数字表示：前两位数字是有效数字，第三位是倍率乘数（精密电阻的标称数值用四位数字表示，参阅第 1 章）。例如，电阻器上印有 114，表示阻值  $110\text{k}\Omega$ ；表面印有 5R6，表示阻值  $5.6\Omega$ ；表面印有 R39，表示阻值  $0.39\Omega$ 。电容器上的 103，表示容量为  $10000\text{pF}$ ，即  $0.01\mu\text{F}$ （大多数小容量电容器的表面不印参数）。圆柱形电阻器用三位或四位色环表示阻值的大小。

虽然 SMC 的体积很小，但它的数值范围和精度并不差（见表 14-18）。以 SMC 电阻器为例，3214 系列的阻值范围是  $0.39\sim 10\text{M}\Omega$ ，额定功率可达到  $1/4\text{W}$ ，允许偏差有  $\pm 1\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$  和  $\pm 10\%$  四个系列，额定工作温度上限是  $70^\circ\text{C}$ 。

表 14-18 常用典型 SMC 电阻器的主要技术参数

系列型号	3214	2012	1408	1005
阻值范围 ( $\Omega$ )	0.39~10M	2.2~10M	1~10M	10~10M
允许偏差 (%)	$\pm 1$ , $\pm 2$ , $\pm 5$	$\pm 1$ , $\pm 2$ , $\pm 5$	$\pm 2$ , $\pm 5$	$\pm 2$ , $\pm 5$
额定功率 (W)	1/4, 1/8	1/10	1/14	1/14
最大工作电压 (V)	200	140	50	50
工作温度范围/额定温度 ( $^\circ\text{C}$ )	$-55\sim +125/70$	$55\sim +125/70$	$-55\sim +125/70$	$-55\sim +125/70$

片状元器件可以用三种包装形式提供给用户：散装、管状料斗和盘状纸编带。SMC 的阻容元件一般用盘状纸编带包装，便于采用自动化装配设备。

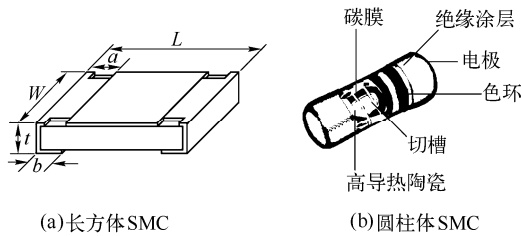


图 14-42 表面安装电阻器的尺寸与结构示意图

(1) 表面安装电阻器

表面安装电阻器按封装外型，可分为片状和圆柱状两种。在图 14-42 中，图 (a) 是片状表面安装电阻器的外形尺寸示意图，图 (b) 是圆柱形表面安装电阻器的结构示意图。表面安装电阻器按制造工艺可分为厚膜型和薄膜型两大类。片状表面安装电阻器一般是用厚膜工艺制作的：在一个高纯度氧化铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 96%) 基底平面上网印  $\text{RuO}_2$  电阻浆来制作电阻膜；改变电阻浆料成分或配比，就能得到不同的电阻值，也可以用激光在电阻膜上刻槽微调电阻值；然后再印刷玻璃浆覆盖电阻膜并烧结成釉保护层，最后



把基片两端做成焊端。圆柱形表面安装电阻器可以用薄膜工艺来制作：在高铝陶瓷基柱表面溅射镍铬合金膜或碳膜，在膜上刻槽调整电阻值，两端压上金属焊端，再涂覆耐热漆形成保护层并印上色环标志。

(2) 表面安装电容器

① 表面安装多层陶瓷电容器。它以陶瓷材料为电容介质，多层陶瓷电容器是在单层盘状电容器的基础上构成的，电极深入电容器内部，并与陶瓷介质相互交错。电极的两端露在外面，并与两端的焊端相连。多层陶瓷电容器的结构如图 14-43 所示。

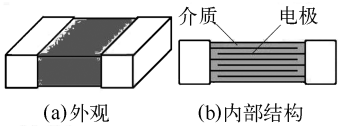


图 14-43 多层陶瓷电容器的结构示意图

表面安装多层陶瓷电容器所用介质有三种：COG、X7R 和 Z5U。其电容量与尺寸、介质的关系见表 14-19。表面安装多层陶瓷电容器的可靠性很高，已经大量用于汽车工业、军事和航天等领域。

表 14-19 不同介质材料的电容量范围

型 号	COG	X7R	Z5U
0805C	10~560pF	120pF~0.012μF	0.033~0.10μF
1206C	680~1400pF	0.014~0.033μF	0.12~0.47μF
1812C	1800~5600pF	0.039~0.12μF	

② 表面安装钽电容器。表面安装钽电容器以金属钽作为电容器介质。除具有可靠性很高的特点外，与陶瓷电容器相比，其体积效率高。表面安装钽电容器的外型都是矩形，按两头的焊端不同，分为非模压式和塑模式两种，目前尚无统一的标注标准。以非模压式钽电容器为例，其尺寸范围为：宽度 1.27~3.81mm，长度 2.54~7.239mm，高度 1.27~2.794mm。电容量范围是 0.1~100μF。直流电压范围为 4~25V。

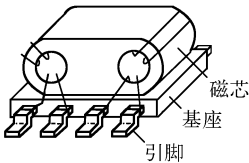


图 14-44 一种表面安装电感器

(3) 表面安装电感器

表面安装电感器，矩形片状形式的电感量较小，其尺寸一般是 4532 或 3214（公制），电感量在 1μH 以下，额定电流是 10~20mA；其他封装形式的可以达到较大的电感量或更大的额定电流，图 14-44 是一种方形扁平封装的互感元件。

(4) SMC 的焊端结构

无引线片状元件 SMC 的电极焊端一般由三层金属构成，如图 14-45 所示。焊端的内部电极通常是采用厚膜技术制作的钯银（Pd-Ag）合金电极，中间电极是在内部电极上的镀镍（Ni）阻挡层，外部电极是铅锡（Sn-Pb）合金。中间电极的作用是，避免在高温焊接时焊料中的铅和银发生置换反应而导致厚膜电极“脱帽”，造成虚焊或脱焊。镍的耐热性和稳定性好，对钯银内部电极起到了阻挡层的作用；但镍的可焊接性较差，镀铅锡合金的外部电极可以提高可焊接性。

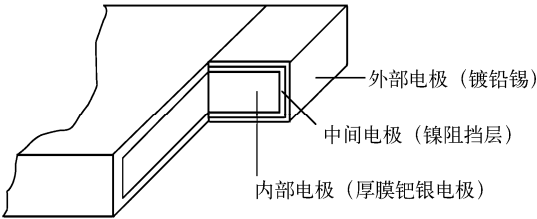


图 14-45 SMC 的焊端构成

## 5. SMD 分立器件

SMD 分立器件包括各种分立半导体器件，有二极管、三极管、场效应管，也有由两、三只三极管、二极管组成的简单复合电路。

### (1) SMD 分立器件的外形尺寸

典型 SMD 分立器件的外形尺寸如图 14-46 所示，电极引脚数为 2~6 个。二极管类器件一般采用二端或三端 SMD 封装，小功率三极管类器件一般采用三端或四端 SMD 封装，四端~六端 SMD 器件内大多封装了两只三极管或场效应管。

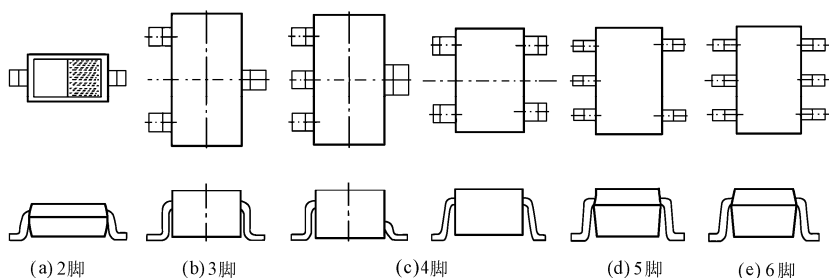


图 14-46 典型 SMD 分立器件的外形尺寸

### (2) 二极管

① 无引线柱形玻璃封装二极管。它将管芯封装在细玻璃管内，两端以金属帽为电极。通常用于稳压、开关和通用二极管，功耗一般为 0.5~1W。

② 塑封二极管。用塑料封装管芯，有两根翼形短引线，一般做成矩形片状，额定电流 140mA~1A，耐压 50~400V。

### (3) 三极管

三极管采用带有翼形短引线的塑料封装 (Short Out-line Transistor, SOT)，可分为 SOT23、SOT89、SOT143 几种尺寸结构。产品有小功率管、大功率管、场效应管和高频管几个系列。小功率管额定功率为 100~300mW，电流为 10~700mA。大功率管额定功率为 300mW~2W，两条连在一起的引脚是集电极。各厂商产品的电极引出方式不同，在选用时必须查阅手册资料。

SMD 分立器件的包装方式要便于自动化安装设备拾取，电极引脚数目较少的 SMD 分立器件一般采用盘状纸编带包装。

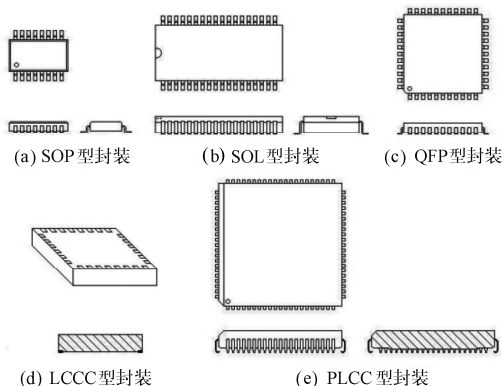


图 14-47 常见 SMD 集成电路封装的外形

## 6. SMD 集成电路

SMD 集成电路包括各种数字电路和模拟电路的 SSI~ULSI 集成器件。由于工艺技术的进步，SMD 集成电路的电气性能指标比 THT 集成电路更好一些。常见 SMD 集成电路封装的外形如图 14-47 所示。与传统的双列直插 (DIP)、单列直插 (SIP) 式集成电路不同，商品 SMD 集成电路按照它们的封装方式，可以分成下列几类：

### (1) SO (Short Out-line) 封装

引线比较少的小规模集成电路大多采用这种小型封装。SO 封装又分为几种，芯片宽度小于 0.14 英寸、电极引脚数目少于 18 脚的，叫做 SOP (Short Out-line Package) 封装，如图 14-47 (a) 所示；其中

薄形封装的叫做 TSOP 封装; 0.25 英寸宽的、电极引脚数目在 20~44 以上的, 叫做 SOL 封装, 如图 14-47 (b) 所示。SO 封装的引脚采用翼形电极, 引脚间距有 1.27mm、1.0mm、0.8mm、0.65mm 和 0.5mm。

### (2) QFP (Quad Flat Package) 封装

矩形四边都有电极引脚的 SMD 集成电路叫做 QFP 封装, 其中 PQFP (Plastic QFP) 封装的芯片四角有凸出(角耳), 薄形 TQFP 封装的厚度已经降到 1.0mm 或 0.5mm。QFP 封装也采用翼形的电极引脚形状, 如图 14-47 (c) 所示。QFP 封装的芯片一般都是大规模集成电路, 在商品化的 QFP 芯片中, 电极引脚数目最少的有 20 脚, 最多可能达到 300 脚以上, 引脚间距最小的是 0.4mm (最小极限是 0.3mm), 最大的是 1.27mm。

### (3) LCCC (Leadless Ceramic Chip Carrier) 封装

这是 SMD 集成电路中没有引脚的一种封装, 芯片被封装在陶瓷载体上, 无引线的电极焊端排列在封装底面上的四边, 电极数目为 18~146 个, 间距 1.27mm, 其外形如图 14-47 (d) 所示。

### (4) PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier) 封装

这也是一种集成电路的矩形封装, 它的引脚向内钩回, 叫做钩形 (J 形) 电极, 电极引脚数目为 14~84 个, 间距为 1.27mm, 其外形如图 14-47 (e) 所示。PLCC 封装的集成电路大多是可编程的存储器, 芯片可以安装在专用的插座上, 容易取下来对它改写其中的数据。为了减少插座的成本, PLCC 芯片也可以直接焊接在电路板上, 但用手工焊接比较困难。

从图 14-48 可以看出 SMD 集成电路和传统的 DIP 集成电路在内部引线结构上的差别。显然, SMD 内部的引线结构比较均匀, 引线总长度更短, 这对于器件的小型化和提高集成度来说, 是更加合理的方案。

引脚数目少的集成电路一般采用塑料管包装, 引脚数目多的集成电路通常用防静电的塑料托盘包装。

## 7. SMD 的引脚形状

### (1) 两种形式

表面安装器件 SMD 的 I/O 电极有两种形式: 无引脚和有引脚。无引脚形式由陶瓷芯片载体封装 (LCCC), 这种器件贴装后, 芯片底面上的电极焊端与印制电路板上的焊盘直接连接, 可靠性较高。有引脚器件贴装后的可靠性与引脚的形状有关。所以, 引脚的形状比较重要。

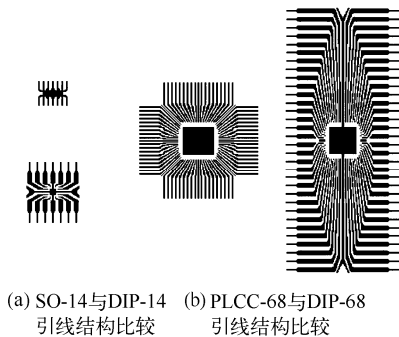


图 14-48 SMD 与 DIP 器件的内部引线结构

(2) 占主导地位的引脚形状 有翼形、钩形和球形三种。图 14-49 (a)、(b)、(c) 分别是翼形、钩形和球形引脚示意图。翼形引脚用于 SOT/SOP/QFP 封装, 钩形引脚用于 SOJ/PLCC 封装, 球形引脚用于下文介绍的 BGA/CSP/Flip Chip 封装。

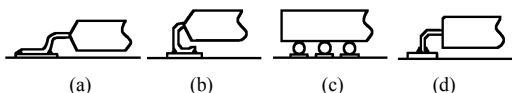


图 14-49 SMD 引脚形状示意图

(3) 翼形引脚的主要特点 符合引脚薄而窄以及小间距的发展趋势, 可采用包括热阻焊在内的各种焊接工艺来进行焊接, 但在运输和装卸过程中容易损坏引脚。

(4) 钩形引脚的主要特点 空间利用率比翼形引脚高, 它可以用除热阻焊外的大部分再流焊进行焊接, 比翼形引脚坚固。

在 SMD 的发展过程中, 还有过一种引脚形状叫对接引脚, 如图 14-49 (d) 所示。对接引脚

是将普通的 DIP 封装引脚截短后得到, 对接引脚的成本低, 引脚间布线空间相对比较大。但对接引脚焊点的拉力和剪切力比翼形或 J 形引脚低 65%。

#### 8. 大规模集成电路的 BGA 封装

BGA 是大规模集成电路的一种极富生命力的封装方式。对于大规模集成电路的封装来说, 20 世纪 90 年代前期主要采用 QFP (Quad Flat Package) 方式, 而 90 年代后期, BGA 方式已经大量应用。应该说, 导致这种封装方式改变的根本原因是集成电路的集成度迅速提高, 芯片的封装尺寸必须缩小。

QFP 的电极间距的极限是 0.3mm。在装配焊接电路板时, 对 QFP 芯片的贴装精度要求非常严格, 电气连接可靠性要求贴装公差是 0.08mm。间距狭窄的 QFP 电极引脚纤细而脆弱, 容易扭曲或折断, 这就必须保证引脚之间的平行度和平面度。相比之下, BGA 封装的最大优点是 I/O 电极引脚间距大, 典型间距为 1.0 mm、1.27mm 和 1.5mm, 贴装公差为 0.3mm。用普通多功能贴装机和再流焊设备就能基本满足 BGA 的组装要求。BGA 的尺寸比相同功能的 QFP 要小得多, 有利于 PCB 组装密度的提高。采用 BGA 方式, 使产品的平均线路长度缩短, 改善了组件的电气性能和热性能。另外, 焊料球的高度表面张力导致再流焊时器件的自校准效应, 这使贴装操作简单易行, 降低了精度要求, 贴装失误率

大幅度下降, 显著提高了组装的可靠性。显然, BGA 封装方式是大规模集成电路提高 I/O 端子数量、提高装配密度、改善电气性能的最佳选择。近年来, 1.5mm 和 1.27mm 引脚间距的 BGA 正在取代 0.5mm 和 0.4mm 间距的 PLCC/QFP。

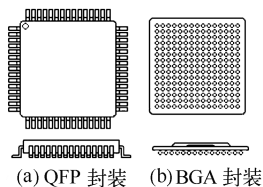


图 14-50 QFP 和 BGA 封装的集成电路比较

比较 QFP 和 BGA 封装的集成电路如图 14-50 所示。显然, 图 (a) 所示的 QFP 封装芯片, 从器件本体四周“单线性”顺序引出翼形电极的方式, 其电极引脚之间的距离不可能非常小。随之而来的问题是提高芯片的集成度, 必然使电路的输入/输出电极增加, 但电极引脚间距的限制导致芯片的封装面积变大。

BGA 方式封装的大规模集成电路如图 14-50 (b) 所示。BGA 封装是将原来器件 PLCC/QFP 封装的 J 形或翼形电极引脚, 改变成球形引脚; 把从器件本体四周“单线性”顺列引出的电极, 改变成本体底面之下“全平面”式的格栅阵排列。这样, 既可以疏散引脚间距, 又能够增加引脚数目。

BGA 方式能够显著地缩小芯片的封装表面积: 假设某个大规模集成电路有 400 个 I/O 电极引脚, 同样取电极引脚的间距为 1.27mm, 则正方形 QFP 芯片每边 100 条引脚, 边长至少达到 127mm, 芯片的表面积要  $140\text{cm}^2$  以上; 而正方形 BGA 芯片的电极引脚按  $20 \times 20$  的行列均匀排布在芯片的下面, 边长只需 25.4mm, 芯片的表面积还不到  $7\text{cm}^2$ 。相同功能的大规模集成电路, BGA 封装的尺寸比 QFP 的封装要小得多, 因而有利于在 PCB 电路板上提高装配密度。

正因为 BGA 封装有比较明显的优越性, 所以大规模集成电路的 BGA 品种也在迅速多样化。现在已经出现多种形式, 如陶瓷 BGA (CBGA)、塑料 BGA (PBGA)、载带 BGA (TBGA)、陶瓷柱 BGA (CCGA)、中空金属 BGA (MBGA) 以及柔性 BGA (Micro-BGA、 $\mu\text{BGA}$  或 CSP) 等, 前三者的主要区分在于封装的基底材料, 如 CBGA 采用陶瓷, PBGA 采用 BT 树脂, TBGA 采用两层金属复合等; 而后者是指那些封装尺寸与片芯尺寸比较接近的小型封装的集成电路。

从装配焊接的角度看, BGA 芯片的贴装公差为 0.3mm, 比 QFP 芯片的贴装精度要求 0.08mm 低得多。这就使 BGA 芯片的贴装可靠性显著提高, 工艺失误率大幅度下降, 用普通多功能贴装机和再流焊设备就能基本满足组装要求。采用 BGA 芯片, 使产品的平均线路长度缩短, 改善了

电路的频率响应和其他电气性能。另外,用再流焊设备焊接时,锡珠的高度表面张力导致芯片的自校准(自“对中”)效应,提高了装配焊接的质量。目前可以见到的一般 BGA 芯片,焊球间距有 1.5mm、1.27mm、1.0mm 三种;而  $\mu$ BGA 芯片的焊球间距有 0.8mm、0.65mm、0.5mm、0.4mm 和 0.3mm 多种。

正是由于上述优点,目前 200 条以上 I/O 端子数的大规模集成电路大多采用 BGA 封装方式,这种集成电路已经被大量使用在现代电子设备整机产品中。例如,电脑中的 CPU、总线控制器、数据控制器、显示控制器芯片等都采用 BGA 封装,其封装形式大多是 PBGA;移动电话(手机)中的中央处理器芯片也采用 BGA 封装,其封装形式多为  $\mu$ BGA。

图 14-51 所示是几种典型的 BGA 结构。其中,图(a)是 PBGA,图(b)是柔性微型 BGA ( $\mu$ BGA),图(c)是管芯上置的载带 TBGA,图(d)是管芯下置的载带 TBGA,图(e)是陶瓷 CBGA,图(f)是一种 BGA 的外观照片,可见其球状引脚数目是  $14 \times 14 = 196$ 。

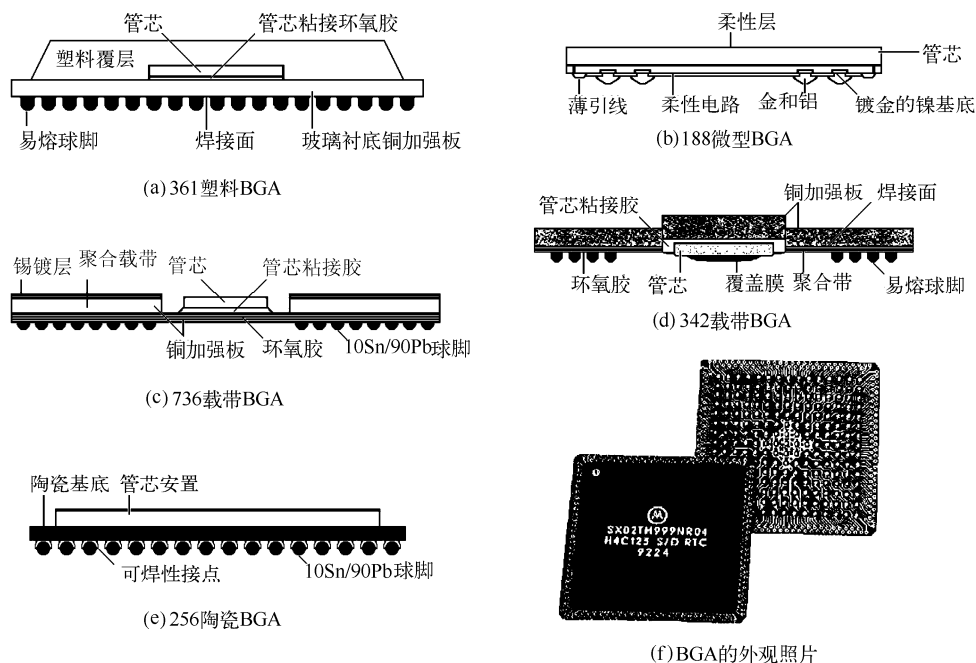


图 14-51 大规模集成电路的几种 BGA 封装结构

## 9. SMT 元器件的选择

选择表面安装元器件,应该根据系统和电路的要求,综合考虑市场供应商所能提供的规格、性能和价格等因素。主要从以下两方面进行选择。

### (1) SMT 元器件类型选择

- ① 选择元器件时要注意贴片机的精度。
- ② 钽和铝电容器主要用于容量大的场合。
- ③ PLCC 芯片的面积小,引脚不易变形,但维修不够方便。
- ④ LCCC 的可靠性高但价格高,主要用于军用产品中,而且必须考虑器件与电路板之间的热膨胀系数是否一致的问题。
- ⑤ 机电元件最好选用有引脚的元件。

(2) SMT 元器件的包装选择

SMC/SMD 元器件厂商向用户提供的包装形式有散装、盘状编带、管装和托盘，后三种包装的形式如图 14-52 所示。

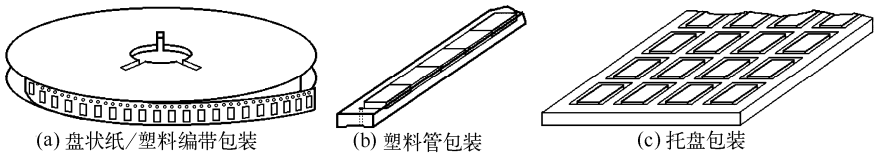


图 14-52 SMT 元器件的包装形式

① 散装。无引线且无极性的 SMC 元件可以散装，例如，一般矩形、圆柱形电容器和电阻器。散装的元件成本低，但不利于自动化设备拾取和贴装。

② 盘状编带包装。编带包装适用于除大尺寸 QFP、PLCC、LCCC 芯片以外的其他元器件，如图 14-52 (a) 所示。SMT 元器件的包装编带有纸带和塑料带两种。

纸编带主要用于包装片状电阻、片状电容、圆柱状二极管、SOT 晶体管。纸带一般宽 8mm，包装元器件以后盘绕在塑料架上。

塑料编带包装的元器件种类很多，各种无引线元件、复合元件、异形元件、SOT 晶体管、引线少的 SOP/QFP 集成电路等。

纸编带和塑料编带的一边有一排定位孔，用于贴片机在拾取元器件时引导纸带前进并定位。定位孔的孔距为 4mm（元件小于 0402 系列的编带孔距为 2mm）。在编带上的元件间距依元器件的长度而定，取 4mm 的倍数。编带的尺寸标准见表 14-20。

表 14-20 SMT 元器件的包装编带的尺寸标准

编带宽度 (mm)	8	12	14	24	32	44	56
元器件间距 (mm) (4 的倍数)	2, 4	4, 8	4, 8, 12	12, 14, 20, 24	14, 20, 24, 28, 32	24, 28, 32, 36, 40, 44	40, 44, 48, 52, 56

③ 管式包装。如图 14-52 (b) 所示，管式包装主要用于 SOP、SOJ、PLCC 集成电路、PLCC 插座和异形元件等，从整机产品的生产类型看，管式包装适合于品种多、批量小的产品。

④ 托盘包装。如图 14-52 (c) 所示，托盘包装主要用于 QFP、窄间距 SOP、PLCC、BGA 集成电路等器件。

10. 使用 SMT 元器件的注意事项

(1) 表面贴装元器件存放的环境条件

库存温度<40℃；生产现场温度<30℃；环境相对湿度<60%；库存及使用环境中不得有影响焊接性能的硫、氯、酸等有毒气体；要满足 SMT 元器件对防静电的要求。

(2) 使用环境

① 从元器件厂家的生产日期算起，库存时间不超过两年；整机厂用户购买后的库存时间一般不超过一年；假如是自然环境比较潮湿的整机厂，购入 SMT 元器件以后应在三个月内使用。

② 对有防潮要求的 SMD 器件，开封后 72 小时内必须使用完毕，最长也不要超过一周。如果不能用完，应存放在 RH20% 的干燥箱内，已受潮的 SMD 器件要按规定进行除潮烘干处理。

③ 在运输、分料、检验或手工贴装时，假如工作人员需要拿取 SMD 器件，应该佩戴防静电腕带，尽量使用吸笔操作，并特别注意避免碰伤 SOP、QFP 等器件的引脚，预防引脚翘曲变形。

### (3) 贴片工序对贴装元器件的要求

① 元器件的类型、型号、标称值和极性等特征标记，都应该符合产品装配图和明细表的要求。

② 贴装元器件的焊端或引脚上不小于  $1/2$  的厚度要浸入焊膏，一般元器件贴片时，焊膏挤出量应小于  $0.2\text{mm}$ ；窄间距元器件的焊膏挤出量应小于  $0.1\text{mm}$ 。

③ 元器件的焊端或引脚均应该尽量与焊盘图形对齐、居中。因为再流焊时的自定位效应，元器件的贴装位置允许一定的偏差。

### (4) 元器件贴装偏差范围

① 矩形元器件允许的贴装偏差范围。如图 14-53 所示，图 (a) 的元器件贴装优良，元器件的焊端居中位于焊盘上。图 (b) 表示元件在贴装时发生横向移位（规定元器件的长度方向为“纵向”），合格的标准是：焊端宽度的  $3/4$  以上在焊盘上，即  $D_1 \geq \text{焊端宽度的 } 75\%$ ；否则为不合格。图 (c) 表示元器件在贴装时发生纵向移位，合格的标准是：焊端与焊盘必须交叠；如果  $D_2 \geq 0$ ，则为不合格。图 (d) 表示元器件在贴装时发生旋转偏移，合格的标准是： $D_3 \geq \text{焊端宽度的 } 75\%$ ；否则为不合格。图 (e) 表示元器件在贴装时与焊锡膏图形的关系，合格的标准是：元件焊端必须接触焊锡膏图形；否则为不合格。

② 小外形晶体管 (SOT) 允许的贴装偏差范围：允许有旋转偏差，但引脚必须全部在焊盘上。

③ 小外形集成电路 (SO IC) 允许的贴装偏差范围：允许有平移或旋转偏差，但必须保证引脚宽度的  $3/4$  在焊盘上。如图 14-54 示。

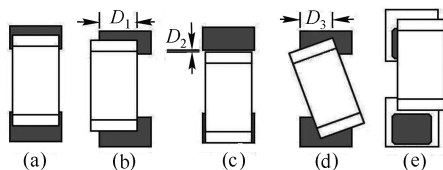


图 14-53 矩形元件贴装偏差

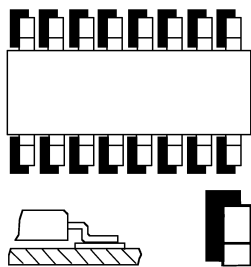


图 14-54 SO IC 集成电路贴装偏差

④ 四边扁平封装器件和超小型器件 (QFP, 包括 PLCC 器件) 允许的贴装偏差范围：要保证引脚宽度的  $3/4$  在焊盘上，允许有旋转偏差，但必须保证引脚长度的  $3/4$  在焊盘上。

⑤ BGA 器件允许的贴装偏差范围：焊球中心与焊盘中心的最大偏移量小于焊球半径，如图 14-55 示。

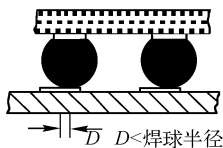


图 14-55 BGA 集成电路贴装偏差

### (5) 元器件贴装压力 (贴片高度)

元器件贴装压力要合适，如果压力过小，元器件焊端或引脚就会浮置在焊锡膏表面，使焊锡膏不能粘住元器件，在传送和再流焊过程中可能会产生位置移动。如果元器件贴装压力过大，焊膏挤出量过大，容易造成焊锡膏外溢粘连，使再流焊时产生桥接，同时也会造成器件的滑动偏移，严重时损坏器件。

### 14.4.1.3 SMT 工艺设备

#### 1. SMT 工序

(1) 模板 首先根据所设计的 PCB 确定是否加工模板。如果 PCB 上的贴片元件只是电阻、电容且封装为 1206 以上的则可不用制作模板，用针筒或自动点胶设备进行锡膏涂敷即可；当在 PCB 中含有 SOT、SOP、PQFP、PLCC 和 BGA 封装的芯片以及电阻、电容的封装为 0805 以下的必须制作模板。一般模板分为化学蚀刻铜模板（价格低，适用于小批量、试验，且芯片引脚间距 $>0.635\text{mm}$ ）；激光蚀刻不锈钢模板（精度高、价格高，适用于大批量、自动生产线，且芯片引脚间距 $<0.5\text{mm}$ ）。

(2) 丝印 其作用是用刮刀将锡膏或贴片胶漏印到 PCB 的焊盘上，为元器件的贴装做准备。所用设备为手动丝印台（丝网印刷机）、模板和刮刀（金属或橡胶），位于 SMT 生产线的最前端。方法将模板固定在丝印台上，通过手动丝印台上的上下和左右旋钮在丝印平台上确定 PCB 的位置，并将此位置固定；然后将所需涂敷的 PCB 放置在丝印平台和模板之间，在丝网板上放置锡膏（在室温下），保持模板和 PCB 的平行，用刮刀将锡膏均匀地涂敷在 PCB 上。在使用过程中注意及时用酒精清洗模板，防止锡膏堵塞模板的漏孔。

(3) 贴装 其作用是将表面贴装元器件准确安装到 PCB 的固定位置上。所用设备为贴片机（自动、半自动或手工），真空吸笔或镊子，位于 SMT 生产线中丝印台的后面。利用真空吸笔可直接从元器件料架上拾取电阻、电容和芯片，借助于锡膏所具有的黏性，可将电阻、电容直接将放置在所需位置上；对于芯片可在真空吸笔头上添加吸盘，吸力的大小可通过旋钮调整。切记无论放置何种元器件注意对准位置，如果位置错位，则必须用酒精清洗 PCB，重新丝印，重新放置元器件。

(4) 回流焊接 其作用是将焊膏熔化，使表面贴装元器件与 PCB 牢固钎焊在一起，以达到设计所要求的电气性能。可完全按照国际标准曲线精密控制，有效防止 PCB 和元器件的热损坏和变形。所用设备为回流焊炉（全自动红外/热风回流焊炉，型号为 QHL320），位于 SMT 生产线中贴片机的后面。

(5) 清洗 其作用是将贴装好的 PCB 上面的影响电性能的物质或焊接残留物，如助焊剂等除去，若使用免清洗焊料一般可以不用清洗。对于要求低功耗产品或高频特性好的产品应进行清洗，一般产品可以免清洗。所用设备为超声波清洗机或用酒精直接手工清洗，位置可以不固定。

(6) 检验 其作用是对贴装好的 PCB 进行焊接质量和装配质量的检验。所用设备有放大镜、显微镜，位置根据检验的需要，可以配置在生产线合适的地方。

(7) 返修 其作用是对检测出现故障的 PCB 进行返工，例如，锡球、锡桥、开路等缺陷。所用工具为智能烙铁、返修工作站等。配置在生产线上任意位置。

#### 2. SMT 印刷机

##### (1) 再流焊工艺焊料供给方法

在再流焊工艺中，将焊料施放在焊接部位的主要方法有焊膏法、预敷焊料法和预形成焊料法。

① 焊膏法。这是将焊锡膏涂敷到 PCB 板焊盘图形上的方法，是再流焊工艺中最常用的方法。焊膏涂敷方式有两种，即注射滴涂法和印刷涂敷法。注射滴涂法主要应用在新产品的研制或小批量产品的生产中，可以手工操作，速度慢、精度低但灵活性高。印刷涂敷法又分直接印刷法（也叫模板漏印法或漏板印刷法）和非接触印刷法（也叫丝网印刷法）两种，直接印刷法是目前高档设备广泛应用的方法。

② 预敷焊料法。这也是再流焊工艺中经常使用的施放焊料的方法。在某些应用场合，可以采用电镀法和熔融法，把焊料预敷在元器件电极部位的细微引线上或是 PCB 板的焊盘上。在窄间距器件的组装中，采用电镀法预敷焊料是比较合适的，但电镀法的焊料镀层厚度不够稳定，需要在电镀焊料后再进行一次熔融。经过这样的处理，可以获得稳定的焊料层。



③ 预形成焊料法。它是将焊料制成各种形状，如片状、棒状、微小球状等预先成形的焊料，焊料中可含有助焊剂。这种形式的焊料主要用于半导体芯片的键合部分和扁平封装器件的焊接工艺中。

### (2) SMT 印刷机及其结构

图 14-56 是 SMT 锡膏印刷机的照片。SMT 锡膏印刷机的功能是将焊锡膏或贴片胶正确地漏印到印制板相应的位置上。



图 14-56 SMT 锡膏印刷机

SMT 印刷机大致分为三个档次：手动、半自动和全自动印刷机。半自动和全自动印刷机可以根据具体情况配置各种功能，例如，视觉识别功能、调整电路板传送速度功能、工作台或刮刀  $45^\circ$  角旋转动能（适用于窄间距元器件），以及二维、三维检测功能等，以便提高印刷精度。

无论是哪一种印刷机，都由以下几部分组成：

- ① 夹持 PCB 基板的工作台。包括工作台面、真空或边夹持机构、工作台传输控制机构。
- ② 印刷头系统。包括刮刀、刮刀固定机构、印刷头的传输控制系统等。
- ③ 丝网或模板及其固定机构。
- ④ 为保证印刷精度而配置的其他选件。包括视觉对中系统、擦板系统和二维、三维测量系统等。

### (3) 印刷涂敷法的丝网及模板

在印刷涂敷法中，直接印刷法和非接触印刷法的共同之处是其原理与油墨印刷类似，主要区别在于印刷焊料的介质，即用不同的介质材料来加工印刷图形：无刮动间隙的印刷称为直接（接触式）印刷，它采用的是刚性材料加工的金属漏印模板；有刮动间隙的印刷称为非接触式印刷，它采用的是柔性材料丝网或金属掩膜。刮刀压力、刮动间隙和刮刀移动速度是保证印刷质量的重要参数。

高档 SMT 印刷机一般使用不锈钢薄板制作的漏印模板，这种模板的精度高，但加工困难，因此制作费用高，适合于大批量生产的高密度 SMT 电子设备；手动操作的简易 SMT 印刷机可以使用薄铜板制作的漏印模板，这种模板容易加工，制作费用低廉，适合于小批量生产的电子设备。非接触式丝网印刷法是传统的方法，制作丝网的费用低廉，印刷锡膏的图形精度不高，适用于大批量生产的一般 SMT 电路板。

### (4) 漏印模板印刷法的基本原理

漏印模板印刷法的基本原理如图 14-57 所示。如图 14-57 (a) 所示，将 PCB 板放在工作支架上，由真空泵或机械方式固定，已加工有印刷图形的漏印模板在金属框架上绷紧，模板与 PCB 表面接触，镂空图形网孔与 PCB 板上的焊盘对准，把焊锡膏放在漏印模板上，刮刀（亦称刮板）从模板的一端向另一端移动，同时压刮焊膏通过模板上的镂空图形网孔印制（沉淀）在 PCB 的焊盘上。假如刮刀单向刮锡，沉积在焊盘上的焊锡膏可能会不够饱满；而刮刀双向刮锡，锡膏图形就比较饱满。高档的 SMT 印刷机一般有 A、B 两个刮刀：当刮刀从右向左移动时，刮刀 A 上升，刮刀 B 下降，B 压刮焊膏；当刮刀从左向右移动时，刮刀 B 上升，刮刀 A 下降，A 压刮焊膏。两次刮锡后，PCB 与模板脱离（PCB 下降或模板上升），如图 14-57 (b) 所示，完成锡膏印刷过程。

图 14-57 (c) 描述了简易 SMT 印刷机的操作过程，漏印模板用薄铜板制作，将 PCB 准确定位以后，手持不锈钢刮板进行锡膏印刷。

焊锡膏是一种膏状流体，其印刷过程遵循流体动力学的原理。漏印模板印刷的特征是：模板和 PCB 表面直接接触；刮刀前方的焊膏颗粒沿刮刀前进方向作顺时针走向滚动；漏印模板离开 PCB 表面的过程中，焊膏从网孔转移到 PCB 表面上。

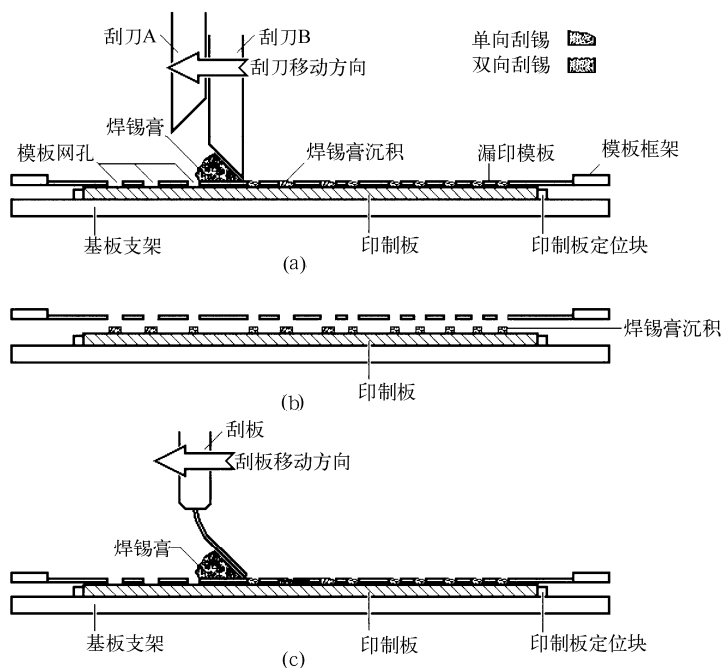


图 14-57 漏印模板印刷法的基本原理

#### (5) 丝网印刷涂敷法的基本原理

用乳剂涂敷到丝网上，只留出印刷图形的开口网目，就制成了非接触式印刷涂敷法所用的丝网。丝网印刷涂敷法的基本原理如图 14-58 所示。

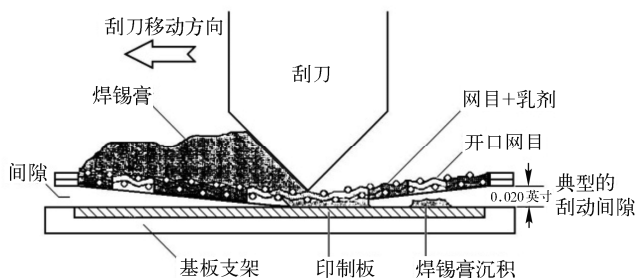


图 14-58 丝网印刷涂敷法

将 PCB 固定在工作支架上，将印刷图形的漏印丝网绷紧在框架上并与 PCB 对准，将焊锡膏放在漏印丝网上，刮刀从丝网上刮过去，压迫丝网与 PCB 表面接触，同时压刮焊膏通过丝网上的图形印刷到 PCB 的焊盘上。

丝网印刷具有以下 3 个特征：丝网和 PCB 表面隔开一小段距离；刮刀前方的焊膏颗粒沿刮板前进方向作顺时针走向滚动；丝网从接触到脱离 PCB 表面的过程中，焊膏从网孔转移到 PCB 表面上。

下面从理论上说明丝网印刷的工作原理。

丝网印刷时，刮刀以一定速度和角度向前移动，对焊锡膏产生一定的压力，推动焊锡膏在刮刀前滚动，产生将焊锡膏注入网孔所需的压力。由于焊膏和贴片胶都是黏性触变流体，焊膏中的黏性摩擦力使其在刮板与丝网之间产生切变。在刮刀刃边缘附近与网孔交接处，焊膏切变速率最大，这就一方面产生使焊膏注入网孔所需的压力，另一方面切变率的提高也使焊膏黏性下降，有利于焊膏注入网孔。所以当刮刀速度和角度适当时，焊膏将会顺利地注入丝网的网孔。因此，刮刀速度、刮刀与丝网的角

度、焊膏黏度和施加在焊膏上的压力,以及由此引起的切变率的大小是影响丝网印刷质量的主要因素。它们相互之间还存在一定的制约关系,正确地控制这些参数,就能获得优良的焊锡膏印刷质量。

当刮刀完成压印动作后,丝网回弹脱离 PCB。结果就在 PCB 表面和丝网之间产生一个低压区,由于丝网焊膏上面的大气压与这一低压区存在压差,所以就将焊锡膏从网孔中推向 PCB 表面,形成印刷的焊锡膏图形。如果由于掩膜边界、PCB 上的通孔等与大气接触表面的影响,不能形成低压区,焊锡膏仍留在网孔中,就不能形成印刷的焊锡膏图形。实际上,对于成功的印刷,刮刀速度  $v$  和焊膏黏度  $\eta$  之间遵循下列关系:  $\eta v \leq \text{某一恒定值}$ 。该恒定值由特定印刷条件决定,与丝网线径、丝网与 PCB 间隙等参数有关。当给定黏度超过某一值时,焊锡膏印刷就不能顺利进行。所以任何给定黏度的焊锡膏,在特定印刷条件下有一个最佳的刮刀速度,而刮刀倾角一般为  $45^\circ$ 。

#### (6) 印刷机的主要技术指标

① 最大印刷面积: 根据最大的 PCB 尺寸确定。

② 印刷精度: 根据印制板组装密度和元器件的引脚间距或球距的最小尺寸确定,一般要求达到  $\pm 0.025\text{mm}$ 。

③ 印刷速度: 根据产量要求确定。

### 3. 自动贴片机

#### (1) 主要结构

片状元器件贴装机,又称贴片机。自动贴片机相当于机器人的机械手,能按照事先编制好的程序把元器件从包装中取出来,并贴放到印制板相应的位置上。由于 SMT 的迅速发展,国外生产贴片机的厂家很多,其型号和规格也有多种,但这些设备的基本结构都是相同的。贴装机的基本结构包括设备本体、片状元器件供给系统、印制板传送与定位装置、贴装头及其驱动定位装置、贴装工具(吸嘴)、计算机控制系统等。为适应高密度超大规模集成电路的贴装,比较先进的贴装机还具有光学检测与视觉对中系统,保证芯片能够高精度地准确定位。图 14-59 是多功能贴片机正在工作时的照片。

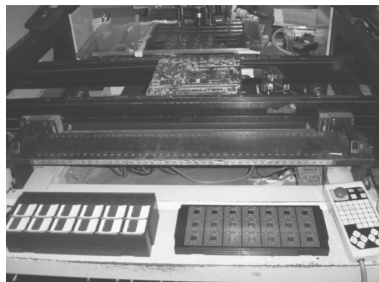


图 14-59 多功能贴片机在工作

① 设备本体。贴片机的设备本体是用来安装和支撑贴装机的底座,一般采用质量大、振动小、有利于保证设备精度的铸铁件制造。

② 贴装头。也叫吸放头,是贴装机上最复杂、最关键的部分,它相当于机械手,它的动作由“拾取-贴放”和“移动-定位”两种模式组成。第一,贴装头通过程序控制,完成三维的往复运动,实现从供料系统取料后移动到电路基板的指定位置上。第二,贴装头的端部有一个用真空泵控制的贴装工具(吸嘴)。不同形状、不同大小的元器件要采用不同的吸嘴拾放:一般元器件采用真空吸嘴,异形元件(例如,没有吸取平面的连接器等)用机械爪结构拾放。当换向阀门打开时,吸嘴的负压把 SMT 元器件从供料系统(散装料仓、管装料斗、盘状纸带或托盘包装)中吸上来;当换向阀门关闭时,吸盘把元器件释放到电路基板上。贴装头通过上述两种模式的组合,完成“拾取-放置”元器件的动作。贴装头还可以用来在电路板指定的位置上点胶,涂敷固定元器件的黏合剂。

贴装头的 X-Y 定位系统一般用直流伺服电机驱动、通过机械丝杠传输力矩,磁尺和光栅定位的精度高于丝杠定位,但后者容易维护修理。

③ 供料系统。适合于表面组装元器件的供料装置有编带、条状管、托盘和散装等几种形式。供料系统的工作状态,根据元器件的包装形式和贴片机的类型而确定。贴装前,将各种类型的供

料装置分别安装到相应的供料器支架上。随着贴装进程，装载着多种不同元器件的散装料仓水平旋转，把即将贴装的那种元器件转到料仓门的下方，便于贴装头拾取；纸带包装元器件的盘装编带随编带架垂直旋转，条状管和定位料斗在水平面上二维移动，为贴装头提供新的待取元件。

④ 电路板定位系统。该系统可以简化为一个固定了电路板的  $X$ - $Y$  二维平面移动的工作台。在计算机控制系统的操纵下，电路板随工作台沿传送轨道移动到工作区域内，并被精确定位，使贴装头能把元器件准确地释放到一定的位置上。精确定位的核心是“对中”，有机械对中、激光对中、激光加视觉混合对中以及全视觉对中等方式。

#### ⑤ 计算机控制系统

计算机控制系统是指指挥贴片机进行准确有序操作的核心，目前大多数贴片机的计算机控制系统都采用 Windows 界面。可以通过高级语言软件或硬件开关，在线或离线编制计算机程序并自动进行优化，控制贴片机的自动工作步骤。每个片状元器件的精确位置，都要编程输入计算机。具有视觉检测系统的贴装机，也是通过计算机实现对电路板上贴片位置的图形识别。

#### (2) 贴片机的主要指标

衡量贴片机的三个重要指标，是精度、速度和适应性。

① 精度。它是贴装机技术规格中的主要技术指标之一。不同的贴装机制造厂家，使用的精度体系有不同的定义。精度与贴片机的对中方式有关，其中以全视觉对中的精度最高。一般来说，贴片的

精度体系应该包含三个项目：贴装精度、分辨率、重复精度，三者之间有一定的相关性。

a. 贴装精度。指元器件贴装后相对于 PCB 上标准贴装位置的偏移量大小，被定义为贴装元器件焊端偏离指定位置最大值的综合位置误差。贴装精度由两种误差组成，即平移误差和旋转误差，如图 14-60 所示。平移误差主要因为  $X$ - $Y$  定位系统不够精确，旋转误差主要因为元

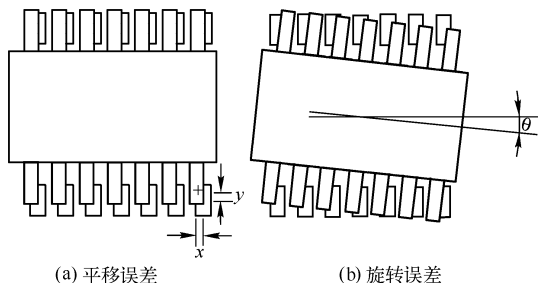


图 14-60 贴片机的贴装精度

件对中机构不够精确和贴装工具存在旋转误差。定量地说，贴装 SMC 要求精度达到  $\pm 0.01\text{mm}$ ，贴装高密度、窄间距的 SMD 至少要求精度达到  $\pm 0.06\text{mm}$ 。

b. 分辨率。它是描述贴装机分辨空间连续点能力的技术指标。贴装机的分辨率由定位驱动电动机和传动轴驱动机构上的旋转位置或线性位置检测装置的分辨率来决定，它是贴装机能够分辨的距离目标位置最近的点。分辨率用来度量贴装机运行时的最小增量，是衡量机器本身精度的重要指标，例如，丝杠的每个步进为  $0.01\text{mm}$ ，那么该贴片机的分辨率为  $0.01\text{mm}$ 。但是，实际贴装精度包括所有误差的总和，因此，描述贴装机性能时很少使用分辨率，一般在比较不同贴装机的性能时才使用它。

c. 重复精度。它是描述贴片头重复返回标定点能力的技术指标。通常采用双向重复精度的概念，它定义为“在一系列试验中，从两个方向接近任一给定点时，离开平均值的偏差”，如图 14-61 所示。

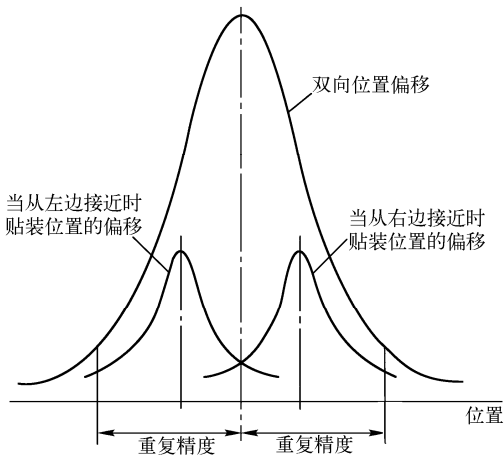


图 14-61 贴片机的重复精度

② 贴片速度。影响贴装机贴装速度的因素有许多,例如,PCB 的设计质量、元器件供料器的数量和位置等。一般高速机贴装速度高于 0.2s/片,目前最高贴装速度为 0.06s/片;高精度、多功能机一般都是中速机,贴装速度为 0.3~0.6s/片左右。贴装机速度主要用以下几个指标来衡量。

a. 贴装周期。指完成一个贴装过程所用的时间,它包括从拾取元器件、元器件定心、检测、贴放和返回到拾取元器件的位置这一过程所用的时间。

b. 贴装率。指在一小时内完成的贴装周期数。测算时,先测出贴装机在 50mm×250mm 的 PCB 上装均匀分布的 140 只片式元器件的时间,然后计算出贴装一只元器件的平均时间,最后计算出一小时贴装的元器件数量,即为贴装率。目前高速贴片机的贴装率可达每小时数万片。

c. 生产量。理论上每班的生产量可以根据贴装率来计算,但由于实际的生产量会受到许多因素的影响,与理论值有较大的差异。影响生产量的因素有生产时停机、更换供料器或重新调整 PCB 位置的时间等因素。

③ 适应性。它表征贴装机适应不同贴装要求的能力,包括以下内容。

a. 能贴装的元器件的种类。贴装元器件种类广泛的贴装机,比仅能贴装 SMC 或少量 SMD 类型的贴片机的适应性好。影响贴装元器件类型的主要因素是贴装精度、贴装工具、定心机构与元器件的相容性,以及贴装机能够容纳供料器的数目和种类。一般高速贴片机主要可以贴装各种 SMC 元件和较小的 SMD 器件(最大约 25mm×30mm);多功能机可以贴装从 1.0mm×0.5mm~54mm×54mm 的 SMD 器件(目前可贴装的元器件尺寸已经达到最小 0.6mm×0.3mm,最大 60mm×60mm),还可以贴装连接器等异形元器件,连接器的最大长度可达 140mm。

b. 贴装机能够容纳供料器的数目和种类。贴装机上供料器的容纳量通常用能装到贴装机上的 8mm 编带供料器的最多数目来衡量。一般高速贴片机的供料器位置大于 120 个,多功能贴片机的供料器位置在 60~120 个之间。由于并不是所有元器件都能包装在 8mm 编带中,所以贴装机的实际容量将随着元器件的类型而变化。

c. 贴装面积。由贴装机传送轨道以及贴装头的运动范围决定。一般可贴装的 PCB 尺寸,最小为 50mm×50mm,最大应大于 250mm×300mm。

d. 贴片机的调整。当贴装机从组装一种类型的电路板转换到组装另一种类型的电路板时,需要进行贴装机的再编程、供料器的更换、电路板传送机构和定位工作台的调整、贴装头的调整和更换等工作。高档贴装机一般采用计算机编程方式进行调整,低档贴装机多采用人工方式进行调整。

④ 贴片机的工作方式和类型。按照贴装元器件的工作方式,贴片机有四种类型,即顺序式、同时式、流水作业式和顺序-同时式。它们在组装速度、精度和灵活性方面各有特色,要根据产品的品种、批量和生产规模进行选择。目前国内电子设备制造企业里使用最多的是顺序式贴片机。

所谓流水作业式贴装机,是指由多个贴装头组合而成的流水线式的机型,每个贴装头负责贴装一种或在电路板上某一部位的元器件,如图 14-62 (a) 所示。这种机型适用于元器件数量较少的小型电路。

顺序式贴装机如图 14-62 (b) 所示,是由单个贴装头顺序地拾取各种片状元器件,固定在工作台上的电路板,由计算机进行控制作 X-Y 方向上的移动,使板上贴装元器件的位置恰位于贴装头的

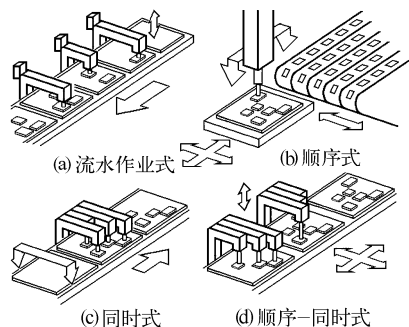


图 14-62 片状元器件贴装机的类型

下面。

同时式贴装机，也叫多贴装头贴片机，是指它有多个贴装头，分别从供料系统中拾取不同的元器件，同时把它们贴放到电路基板的不同位置上，如图 14-62 (c) 所示。

顺序-同时式贴装机，则是顺序式和同时式两种机型功能的组合。片状元器件的放置位置，可以通过电路板作  $X$ - $Y$  方向上的移动或贴装头作  $X$ - $Y$  方向上的移动来实现，也可以通过两者同时移动实施控制，如图 14-62 (d) 所示。

在选购贴片机时，必须考虑其贴装速度、贴装精度、重复精度、送料方式和送料容量等指标，使它既符合当前产品的要求，又能适应近期发展的需要。如果对贴片机性能有比较深入的了解，就能够在购买设备时获得更高的性能价格比。例如，要求贴装一般的片状阻容元件和小型平面集成电路，则可以选购一台多贴装头的贴片机；如果还要贴装引脚密度更高的 PLCC/QFP 器件，就应该选购一台具有视觉识别系统的贴片机和一台用来贴装片状阻容元件的普通贴片机，配合起来使用。供料系统可以根据使用的片状元器件的种类来选定，尽量采用盘状纸带式包装，以便提高贴片机的工作效率。

如果企业生产 SMT 电子设备刚刚起步，应该选择一种由主机加上很多选件组成的中、小型贴片机系统。主机的基本性能好，价格不太高，可以根据需要选购多种附件，组成适应不同产品需要的多功能贴片机。

#### 4. SMT 点胶机

与传统的 THT 技术在焊接前把元器件插装到电路板上不同，SMT 技术是在焊接前把元器件贴装到电路板上。显然，采用再流焊工艺流程进行焊接，依靠焊锡膏就能够把元器件粘贴在电路板上传递到焊接工序；但对于采用波峰焊工艺焊接双面混合装配、双面分别装配（第二、三种装配方式）的电路板来说，由于元器件在焊接过程中位于电路板的下方，所以必须在贴片时用黏合剂进行固定。用来固定 SMT 元器件的黏合剂叫做贴片胶。

##### （1）涂敷贴片胶的方法

涂敷贴片胶到电路板上的常用方法有点滴法、注射法和丝网印刷法。

① 点滴法。说来简单，此法是用针头从容器里蘸取一滴贴片胶，把它点涂到电路基板的焊盘或元器件的焊端上。点滴法只能手工操作，效率很低，要求操作者非常细心，因为贴片胶的量不容易掌握，还要特别注意避免涂到元器件的焊盘上导致焊接不良。

② 注射法。此法既可以手工操作，又能够使用设备自动完成。手工注射贴片胶，是把贴片胶装入注射器，靠手的推力把一定量的贴片胶从针管中挤出来。有经验的操作者可以准确地掌握注射到电路板上的胶量，取得很好的效果。

大批量生产中使用的由计算机控制的点胶机如图 14-63 所示。图 (a) 是根据元器件在电路板上的位置，通过针管组成的注射器阵列，靠压缩空气把贴片胶从容器中挤出来，胶量由针管的大小、加压的时间和压力决定。图 (b) 是把贴片胶直接涂到被贴装头吸住的元器件下面，再把元器件贴装到电路板指定的位置上。

点胶机的功能可以用 SMT 自动贴片机来实现：把贴片机的贴装头换成内装贴片胶的点胶针管，在计算机程序的控制下，把贴片胶高速逐一点涂到印制板的焊盘上。

③ 贴片胶丝网印刷法。用丝网漏印的方法把贴片胶印刷到电路基板上，这是一种成本低、效率高的方法，特别适用于元器件的密度不太高，生产批量比较大的情况。需要注意的关键是，电路板在丝网印刷机上必须准确定位，保证贴片胶涂敷到指定的位置上，避免污染焊接面。

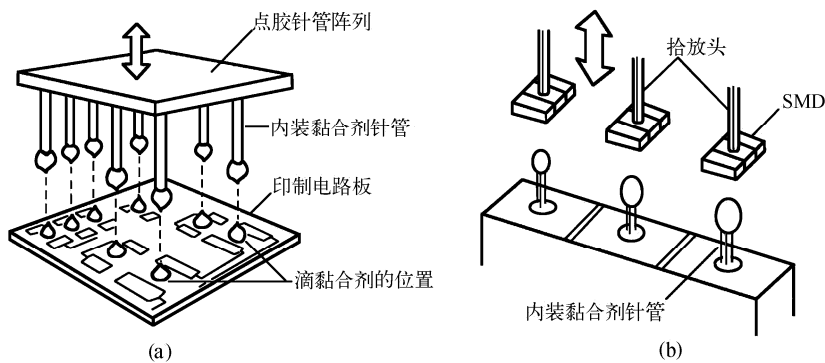


图 14-63 自动点胶机的工作原理示意图

(2) 贴片胶的固化

涂敷贴片胶以后进行贴装元器件，这时需要固化贴片胶，把元器件固定在电路板上。固化贴片胶可以采用多种方法，比较典型的方法有三种：

- ① 用电热烘箱或红外线辐射，对贴装了元器件的电路板加热一定的时间。
- ② 在黏合剂中混合添加一种硬化剂，使粘接了元器件的贴片胶在室温中固化，也可以通过提高环境温度加速固化。
- ③ 采用紫外线辐射固化贴片胶。

(3) 装配流程中的贴片胶涂敷工序

在元器件混合装配结构的电路板生产过程中，涂敷贴片胶是重要的工序之一，它与前后工序的关系如图 14-64 所示。其中，图 (a) 是先插装引线元器件，后贴装 SMT 元器件的方案；图 (b) 是先贴装 SMT 元器件，后插装引线元器件的方案。比较这两个方案，后者更适合用自动生产线进行大批量生产。

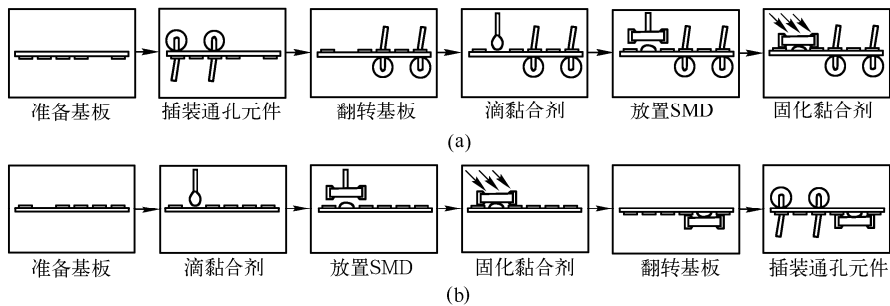


图 14-64 混合装配结构生产过程中的贴片胶涂敷工序

(4) 涂敷贴片胶的技术要求

有通过光照或加热方法固化的两类贴片胶，涂敷光固型和热固型贴片胶的技术要求也不相同。如图 14-65 所示，图 (a) 表示光固型贴片胶的位置，因为贴片胶至少应该从元器件的下面露出一半，才能被光照射而实现固化；图 (b) 是热固型贴片胶的位置，因为采用加热固化的方法，所以贴片胶可以完全被元器件覆盖。

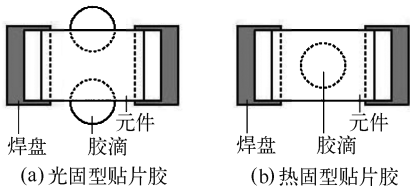


图 14-65 贴片胶的点涂位置

贴片胶滴的大小和胶量，要根据元器件的尺寸和重量来确定，以保证足够的黏结强度为准：小型元件下面一般只点涂一滴贴片胶，体积大的元

器件下面可以点涂多个胶滴或点涂大一些的胶滴；胶滴的高度应该保证贴装元器件以后能接触到元器件的底部；胶滴也不能太大，要特别注意贴装元器件后不要把胶挤压到元器件的焊端和印制板的焊盘上，造成污染妨碍焊接。

## 5. 再流焊机

### (1) 再流焊炉的结构和主要加热方法

再流焊炉主要由炉体、上下加热源、PCB 传送装置、空气循环装置、冷却装置、排风装置、温度控制装置以及计算机控制系统组成。再流焊的核心环节是将预敷的焊料熔融、再流、浸润。再流焊对焊料加热有不同的方法，就热量的传导来说，主要有辐射和对流两种方式；按照加热区域，可以分为对 PCB 整体加热和局部加热两大类：整体加热的方法主要有红外线加热法、气相加热法、热风加热法、热板加热法；局部加热的方法主要有激光加热法、红外线聚焦加热法、热气流加热法、光束加热法。

#### ① 红外线再流焊 (Infra Red Ray Re-flow)

加热炉使用远红外线辐射作为热源的，叫做红外线再流焊炉。现在国内企业已经能够制造这种焊接设备，所以红外线再流焊是目前使用最为广泛的 SMT 焊接方法。这种方法的主要工作原理是：在设备的隧道式炉膛内，通电的陶瓷发热板（或石英发热管）辐射出远红外线，热风机使热空气对流均匀，让电路板随传动机构直线匀速进入炉膛，顺序通过预热、焊接和冷却三个温区。在预热区里，PCB 在  $100\sim 140^{\circ}\text{C}$  的温度下均匀预热  $2\sim 3\text{min}$ ，焊膏中的低沸点溶剂和抗氧化剂挥发，化成烟气排出；同时，焊膏中的助焊剂浸润焊接对象，焊膏软化塌落，覆盖了焊盘和元器件的焊端或引脚，使它们与氧气隔离；并且，电路板和元器件得到充分预热，以免它们进入焊接区因温度突然升高而损坏。在焊接区，温度迅速上升，比焊料合金熔点高  $20\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，漏印在印制板焊盘上的膏状焊料在热空气中再次熔融，浸润焊接面，时间  $30\sim 90\text{s}$ 。当焊接对象从炉膛内的冷却区通过，使焊料冷却凝固以后，全部焊点同时完成焊接。图 14-66 是红外线再流焊机的外观和工作原理示意图。

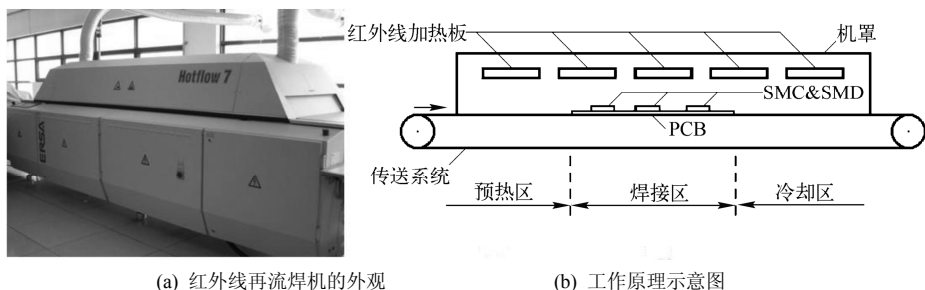


图 14-66 红外线再流焊机的外观和工作原理示意图

红外线再流焊炉的优点是热效率高，温度变化梯度大，温度曲线容易控制，双面焊接电路板时，PCB 的上、下温度差别明显；缺点是同一电路板上的元器件受热不够均匀，特别是当元器件的颜色和体积不同时，受热温度就会不同，为使深颜色的和体积大的元器件同时完成焊接，必须提高焊接温度。

现在，随着温度控制技术的进步，高档的红外线再流焊设备的温度隧道更多地细分了不同的温度区域，例如，把预热区细分为升温区、保温区和快速升温区等。在国内已经能够见到  $7\sim 10$  个温区的再流焊设备。

红外线再流焊设备适用于单面、双面、多层印制板上 SMT 元器件的焊接，以及其他印制电路板、陶瓷基板、金属芯基板上的再流焊，也可以用于电子器件、组件、芯片的再流焊，还可以对印制板进行热风整平、烘干，对电子设备进行烘烤、加热或固化黏合剂。红外线再流焊设备



既能够单机操作，也可以联入电子装配生产线配套使用。

红外线再流焊设备还可以用来焊接电路板的两面：先在电路板的 A 面漏印焊膏，粘贴 SMT 元器件后入炉完成焊接；然后在 B 面漏印焊膏，粘贴元器件后再次入炉焊接。这时，电路板的 B 面朝上，在正常的温度控制下完成焊接；A 面朝下，受热温度较低，已经焊好的元器件不会从板上脱落下来。这种工作状态如图 14-67 所示。

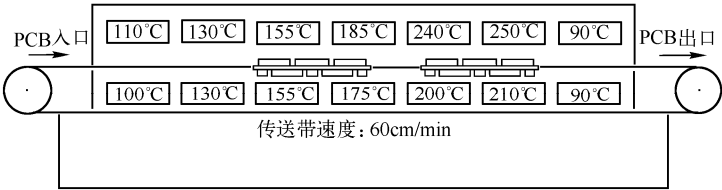


图 14-67 再流焊时电路板两面的温度不同

② 气相再流焊（Vapor Phase Re-flow）。

这是美国西屋公司于 1974 年首创的焊接方法，在美国的 SMT 焊接中占有很高比例。其工作原理是：把介质的饱和蒸汽转变成成为相同温度（沸点温度）下的液体，释放出潜热，使膏状焊料熔融浸润，从而使电路板上的所有焊点同时完成焊接。这种焊接方法的介质液体要有较高的沸点（高于铅锡焊料的熔点），有良好的热稳定性，不自燃。美国 3M 公司配制的介质液体见表 14-21。为了减少焊接时介质蒸汽的耗散，还要采用二次保护蒸汽 FC113 等。

气相再流焊的优点是焊接温度均匀、精度高、不会氧化。其缺点是介质液体及设备的价格高，工作时介质液体会产生少量有毒的全氟异丁烯（PFIB）气体。图 14-68 是气相再流焊设备的工作原理示意图。

表 14-21 3M 公司配制的介质液体		
介质	FC70（沸点 214℃）	FC71（沸点 253℃）
用途	Sn/Pb 焊料的再流焊	纯 Sn 焊料的再流焊
全称	(C <sub>5</sub> F <sub>11</sub> ) <sub>3</sub> N 全氟戊胺	

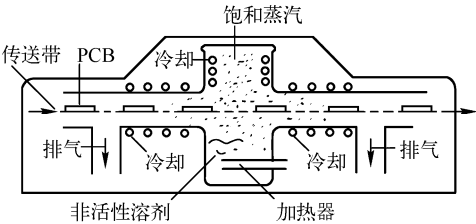


图 14-68 气相再流焊的工作原理示意图

③ 热板传导再流焊。

利用热板传导来加热的焊接方法称为热板再流焊。热板再流焊的工作原理如图 14-69 所示。发热器件为板型，放置在传送带下，传送带由导热性能良好的材料制成。待焊电路板放在传送带上，热量先传送到电路板上，再传至铅锡焊膏与 SMC/SMD 元器件上，软钎料焊膏熔化以后，再通过风冷降温，完成 SMC/SMD 与电路板的焊接。这种设备的热板表面温度不能大于 300℃，适用于高纯度氧化铝基板、陶瓷基板等导热性好的电路板单面焊接，对普通覆铜箔电路板的焊接效果不好。

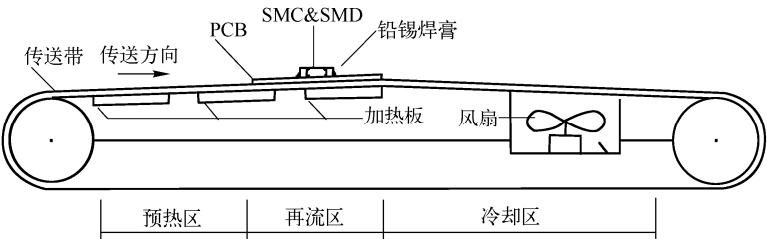


图 14-69 热板再流焊的工作原理

#### ④ 热风对流再流焊与红外热风再流焊。

热风对流再流焊是利用加热器与风扇，使炉膛内的空气或氮气不断加热并强制循环流动，工作原理见图 14-70。这种再流焊设备的加热温度均匀但不够稳定，容易产生氧化，PCB 上、下的温差以及沿炉长方向的温度梯度不容易控制，一般不单独使用。

改进型的红外热风再流焊是按一定热量比例和空间分布，同时混合红外线辐射和热风循环对流来加热的方式，也叫热风对流红外线辐射再流焊。这种方法的特点是各温区独立调节热量，减小热风对流，在电路板的下面采取制冷措施，从而保证加热温度均匀稳定、电路板表面和元器件之间的温差小，因而温度曲线容易控制。红外热风再流焊设备的生产能力高，操作成本低，是 SMT 大批量生产中的主要焊接设备之一。

图 14-71 是一台简易的红外热风再流焊设备，其内部只有一个温区的小加热炉，能够焊接的电路板最大面积为  $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ ；炉内的加热器和风扇受计算机控制，温度随时间变化，电路板在炉内处于静止状态，连续经历预热、再流和冷却的温度过程，进而完成焊接。这种简易设备的价格比隧道炉膛式红外热风再流焊设备低很多，适用于生产批量不大的小型企业。

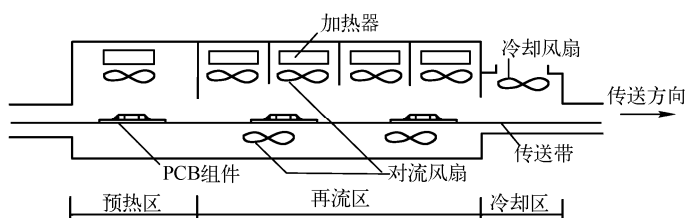


图 14-70 热风对流再流焊



图 14-71 简易的红外热风再流焊设备

#### ⑤ 激光加热再流焊。

激光加热再流焊是利用激光束良好的方向性及功率密度高的特点，通过光学系统将激光束聚集在很小的区域内，在很短的时间内使被加热处形成一个局部的加热区；常用的激光有  $\text{CO}_2$  和 YAG 两种。图 14-72 是激光加热再流焊的工作原理示意图。

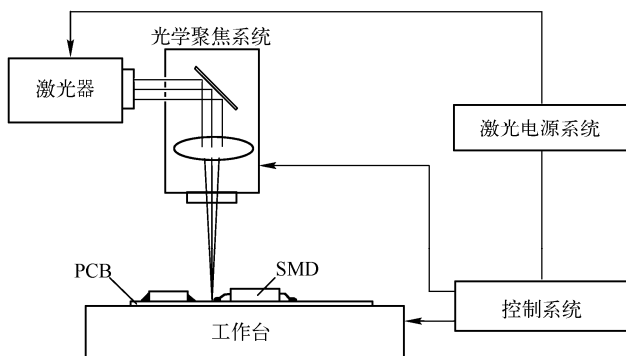


图 14-72 激光加热再流焊

激光加热再流焊的加热，具有高度局部化的特点，不产生热应力，热冲击小，热敏元器件不易损坏。但是设备投资大，维护成本高。

(2) 各种再流焊工艺主要加热方法的优缺点（见表 14-22）

表 14-22 再流焊主要加热方法的优缺点

加 热 方 式	原 理	优 点	缺 点
红外	吸收红外线辐射加热	连续，同时成组焊接；加热效果好，温度可 调范围宽；减少焊料飞溅、虚焊及桥接	材料、颜色与体积不同，热吸收不同， 温度控制不够均匀
气相	利用惰性溶剂的蒸气凝 聚时放出的潜热加热	加热均匀，热冲击小；升温快，温度控制准 确；同时成组焊接；可在无氧环境下焊接	设备和介质费用高；容易出现吊桥和 芯吸现象
热风	高温加热的气体在炉内 循环加热	加热均匀；温度控制容易	容易产生氧化；强风会使元器件产生 位移
热板	利用热板的热传导加热	减少对元器件的热冲击；设备结构简单，价 格低	受基板热传导性能影响大；不适用于 大型基板、大型元器件；温度分布不均 匀
激光	利用激光的热能加热	聚光性好，适用于高精度焊接；非接触加热； 用光纤传送能量	激光在焊接面上反射率大；设备昂贵

(3) 再流焊设备的主要技术指标

- ① 温度控制精度（指传感器灵敏度）：应该达到 $\pm 0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ 。
- ② 传输带横向温差： $<\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。
- ③ 温度曲线调试功能：如果设备无此装置，要外购温度曲线采集器。
- ④ 最高加热温度：一般为  $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ ，如果考虑温度更高的无铅焊接或金属基板焊接，应该选择  $350^{\circ}\text{C}$  以上。
- ⑤ 加热区数量及长度：加热区数量越多、长度越长，越容易调整和控制温度曲线。一般中小批量生产，选择 4~5 个温区、加热长度 1.8m 左右的设备，即能满足要求。
- ⑥ 传送带宽度：根据最大和最宽的 PCB 尺寸确定。

6. SMT 电路板的焊接检测设备

SMT 电路的小型化和高密度化，使得检验工作日益繁重，依靠人工目视检验的难度越来越高，判断标准也不能完全一致。目前，生产厂家在大批量生产过程中，广泛使用自动光学检测（AOI）或 X 射线检测技术及设备检测 SMT 电路板的焊接质量。这两类检测系统的主要差别在于对不同光信号的采集处理方式有所不同。

(1) AOI 自动光学检测系统

AOI 的工作原理与贴片机、SMT 印刷机所用的光学视觉系统的原理相同，基本有两种，即设计规则检验法（DRC）和图形识别方法。DRC 法是按照一些给定的设计规则来检查电路图形，它能从算法上保证被检测电路的正确性，统一评判标准，帮助制造过程控制质量，并具有处理数据速度快、编程工作量大等特点，但它对边界条件的确定能力较差；图形识别法是将已经储存的数字化设计图形与实际产品图形相比较，按照完好的电路样板或计算机辅助设计时编制的检查程序进行比较，检查精度取决于系统的分辨率和检查程序的设定。这种方法用设计数据代替 DRC 方法中的预定设计规则，具有明显的优越性，但其采集的数据量较大，对系统的实时性反映能力的要求较高。

AOI 系统用可见光（激光）或不可见光（X 射线）作为检测光源，光学部分采集需要检测的图形，由图像处理软件对数据进行处理、分析和判断，不仅能够从外观上检查 PCB 板和元器件的质量，也可以在贴片焊接工序以后检查焊点的质量。AOI 的工作原理模型如图 14-73 所示。

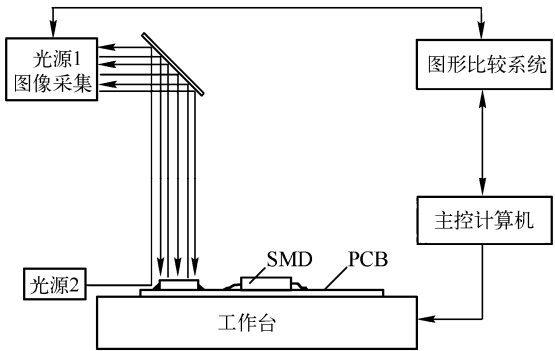


图 14-73 AOI 的工作原理模型

AOI 的主要功能：检查电路板有引线的一面，保证引线焊端排列和弯折适当；检查电路板正面，判断是否存在元器件缺漏、安装错误、外形损伤、安装方向错误等现象；检查元器件表面印制的标记质量等。

AOI 系统允许正常的产品通过，发现电路板装配焊接的缺陷，便会记录缺陷的类型和特征，并向操作者发出信号，或者触发执行机构自动取下不良部件送回返修系统。AOI 系统还会对缺陷进行分析和统计，为主控计算机调整制造过程提供依据。AOI 系统使用方便、调整容易。目前市场上出售的 AOI 系统，可以完成的检查项目一般包括元器件缺漏检查、元器件识别、SMD 方向检查、焊点检查、引线检查、反接检查等。

AOI 系统的不足之处是只能进行图形的直观检验，检测的效果依赖系统的分辨率。它不能检测不可见的焊点和元器件，也不能从电性能上定量地进行测试，条件好的企业一般更多地装备了在线测试（ICT）设备。AOI 系统的另一个缺点是价格昂贵。

## （2）X 射线检测

PLCC、SOJ、BGA、CSP 和 FC 芯片的焊点在器件的下面，用人眼和 AOI 系统都不能检验，因此用 X 射线检测就成为判断这些器件焊接质量的主要方法。现在的 X 射线检测设备大致可以分成以下三种：

① X 射线传输测试系统。适用于检测单面贴装了 BGA 等芯片的电路板。其缺点是不能区分垂直重叠的焊点。

② X 射线断面测试或三维测试系统。它克服了①所述系统的缺点，可以进行分层断面检测，相当于工业 CT 机。

③ X 射线和 ICT 结合的检测系统。用 ICT 在线测试补偿 X 射线检测的不足之处，适用于高密度、双面贴装 BGA 等芯片的电路板。

## 7. 溶剂清洗设备

溶剂清洗设备，用于清除电路板上的残留污物。按使用的场合不同，可分为在线式清洗器和批量式清洗器两大类，每一类清洗器中都能加入超声波冲击或高压喷射清洗功能。这两类清洗设备的清洗原理是相同的，都采用冷凝-蒸发的原理清除残留污物。主要步骤是：将溶剂加热使其产生蒸汽，将较冷的被清洗电路板置于溶剂蒸汽中，溶剂蒸汽冷凝在电路板上，溶解残留污物，然后，将被溶解的残留污物蒸发掉；被清洗电路板冷却后再置于溶剂蒸汽中。循环上述过程数次，直到把残留污物完全清除。

（1）在线式清洗器，用于大批量生产的场合。它的操作是全自动的，有全封闭的溶剂蒸发系统，能够做到溶剂蒸汽不外泄。在线式清洗器可以加入高压倾斜喷射和扇形喷射的机械去污方法，特别适用于表面安装电路板的清洗。

（2）批量式清洗器，适用于小批量生产的场合，如在实验室中应用。它的操作是半自动的，溶剂蒸汽会有少量外泄，对环境有不利的影响。

## 8. SMT 电路板维修工作站

对采用 SMT 工艺的电路板进行维修，或者对品种变化多而批量不大的产品进行生产的时候，SMT 维修工作站能够发挥很好的作用。维修工作站实际是一个小型化的贴片机和焊接设备的组合装置，但贴装、焊接片状元器件的速度比较慢。大多维修工作站装备了高分辨率的光学检测系统和图像采集系统，操作者可以从监视器的屏幕上看到放大的电路焊盘和元器件电极的图像，使元器件能够高精度地定位贴装。高档的维修工作站甚至有两个以上摄像镜头，能够把从不同角度摄取的画面叠加在屏幕上。操作者可以看着屏幕仔细调整贴装头，让两幅画面完全重合，实现多引脚的 SOJ、

PLCC、QFP、BGA、CSP 等器件在电路板上准确定位。

SMT 维修工作站都备有与各种元器件规格相配的红外线加热炉、电热工具或热风焊枪，不仅可以用来拆焊那些需要更换的元器件，还能熔融焊料，把新贴装的元器件焊接上去。目前，国内企业中常见的 SMT 维修工作站大多是进口设备，德国 ERSA 公司和美国 OK 公司制造的机型是知名品牌的维修工作站。图 14-74 是 ERSA 公司的 IR-550 维修工作站的照片。

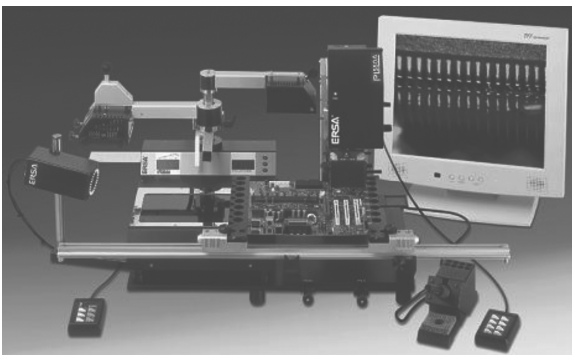


图 14-74 ERSA IR-550 维修工作站

9. SMT 生产线的设备组合

SMT 生产线的主要设备包括锡膏印刷机、点胶机、贴装机、再流焊炉和波峰焊机。辅助设备有检测设备、返修设备、清洗设备、干燥设备和物料存储设备等。按照自动化程度，SMT 生产线可以分为全自动和半自动生产线；按照生产规模的大小，又可以分为大型、中型和小型生产线。

全自动生产线，是指整条生产线的设备都是全自动设备，通过电路板自动装载机（上板机）、缓冲连接线和自动卸板机，将所有生产设备连接成一条自动生产线；半自动生产线主要因为印刷机是半自动的，需要人工印刷或人工装卸电路板，使生产设备线不能自动连接或没有完全连接起来。

大型生产线具有较大的生产能力，单面贴装生产线上的贴装设备由一台多功能贴装机和多台高速贴装机组成，靠自动翻板机把两条单面贴装生产线连接起来，就构成了双面贴装生产线。

适合中小企业和研究单位使用的中、小型 SMT 贴装生产线，可以是全自动或半自动线，满足多品种或单一品种的要求。如果生产量不大，其中的贴装设备一般选用较高速度的中、小型多功能贴片机；如果有一定的生产量，则由一台多功能贴装机和两台高速贴装机组成。中、小型 SMT 自动生产流水线设备配置平面图如图 14-75 所示。

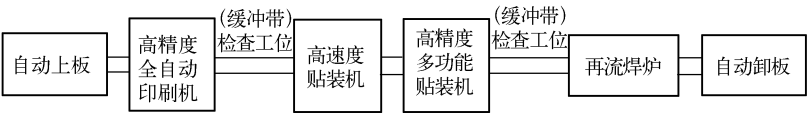


图 14-75 中、小型 SMT 贴装自动生产流水线设备配置平面图

14.4.2 印制板表面安装工艺

14.4.2.1 SMT 电路板安装方案

1. SMT 的安装方式

采用 SMT 的安装方法和工艺过程完全不同于通孔插装式元器件的安装方法和工艺过程。目前，在应用 SMT 技术的电子设备中，有一些是全部都采用了 SMT 元器件的电路，但还可见到所

谓的“混装工艺”，即在同一块印制电路板上，既有插装的传统 THT 元器件，又有表面安装的 SMT 元器件。这样，电路的安装结构就有很多种。

(1) 全部采用表面安装 印制板上没有通孔插装元器件，各种 SMD 和 SMC 被贴装在电路板的一面或两侧，如图 14-76 (a) 所示。

(2) 双面混合安装 如图 14-76 (b) 所示，在印制电路板的 A 面上，既有通孔插装元器件，又有各种 SMT 元器件；在印制板的 B 面上，只装配体积较小的 SMD 晶体管 and SMC 元件。

(3) 两面分别安装 在印制板的 A 面上只安装通孔插装元器件，而小型的 SMT 元器件贴装在印制板的 B 面上，如图 14-76 (c) 所示。

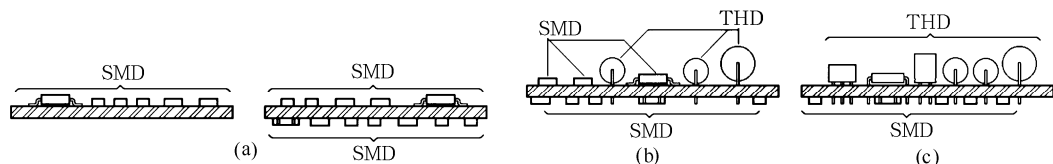


图 14-76 三种 SMT 安装结构示意图

第一种装配结构能够充分体现出 SMT 的技术优势，这种印制电路板最终将会价格最便宜、体积最小。后两种混合装配的印制板可以解决某些元件至今不能采用表面装配形式的问题。从印制电路板的装配焊接工艺来看，第三种装配结构除了要使用贴片胶把 SMT 元器件粘贴在印制板上以外，其余和传统的通孔插装方式的区别不大，特别是可以利用现在已经比较普及的波峰焊设备进行焊接，工艺技术上也比较成熟；而前两种装配结构一般都需要添加再流焊设备。

## 2. 表面安装的一般工艺流程

### (1) 安装基板

基板固定在专用工作台的台面上。

### (2) 点胶

这一工序的目的是粘接 SMD。点胶的作用是将 SMD 粘接在基板上，使用的材料是贴片胶，贴片胶有两种类型，即环氧类胶和聚脂类胶。好的贴片胶应能满足如下的要求：

- ① 固化速度快，凝固时间短。
- ② 绝缘性能好，粘接强度大，常温寿命长。
- ③ 固化时不漫流，固化后能承受波峰焊的高温冲击。
- ④ 具有良好的印刷性和被溶脱（清洗）性。

操作时，根据 SMD 的大小，将不导电的贴片胶施于印制板上（若自动组装，可以通过编程事先确定涂胶点的数量），然后贴 SMD，经一定温度固化后，将 SMD 固定在基板上。

点胶方式常见的有三种：群点点胶、单点点胶、印刷涂胶。

点胶设备：手动点胶器、点胶机、丝网印刷机等。

### (3) 涂膏

若组装工艺采用再流焊，就需要进行涂膏。使用的材料是焊膏，通常由焊料金属粉末、助焊剂和溶剂（载体）三部分混合成糊状浆料，有松香型和水溶性两种。前者性能稳定，几乎无腐蚀性，便于清洗；后者活性剂较强，清洗工艺复杂。目前一般生产厂家常采用松香型焊膏。好的焊膏应满足如下一些要求：

- ① 应有较好的印刷性，热熔时不飞溅、不外流。
- ② 热熔后焊点牢固，无空白点。

③ 有足够的活性，焊后残渣易清洗。

#### (4) 安装 SMD

它需要高精度的自动化设备来进行。贴片机就是用来安装 SMD 的专用设备，其安装精度高，速度快，可靠性好，可单机操作，也可与其他设备连成自动化生产线。目前，采用贴片机贴片速度从每小时数千个至上万个不等，贴片精度在 0.14mm 左右；元件处理能力从单一类型到多个品种。

#### (5) 热固化

固化是在点胶、贴片之后必须进行的一项工作。胶固化后元件可具有足够的强度，避免在运输、基板翻转至另一面贴装及进行焊接时元件受到振动、冲击而移位。有些焊膏也要求在再流焊之前进行固化。

固化一般在专用的固化炉中进行。固化炉制成遂道加热炉形式，基板放在传送带上，在一定的温度、时间控制下通过炉体使胶固化。炉体的加热方式有热板加热和红外加热。根据胶的固化特性不同，不同的胶、不同的基板材料、元件种类及安装密度，其要求的固化温度、固化时间也不同。例如，有些胶要先经过紫外光固化，再进行热固化。所以一般固化炉的加热温度和传送带的速度均是可调的。一般的固化温度在 160℃ 左右，固化时间在 5min 左右。烘箱也可作固化设备，用于只需要进行热固化的胶，设备相对简陋些，固化时间也较长，一般在 160℃ 和 20min 左右。

#### (6) SMD 的焊接

粘接 SMD 的方法有贴片胶和焊膏两种，对应的焊接方法也有两种：SMD 用贴片胶进行粘接，采用波峰焊焊接方法；应用焊膏进行粘接的则利用再流焊方法。

#### (7) 清洗

清洗的目的是为了除去焊剂残渣，尤其是使用焊膏的场合，由于焊膏的成分对印制板有腐蚀性，焊后必须进行清洗。清洗液一般采用共沸点的 20 多种溶剂混合物，如氟利昂。目前比较先进的清洗设备为超声波清洗机。超声波清洗将清洗剂置于超声波区，消磨掉粘在表面的焊剂微粒，达到令人满意的效果，可以保证清洗效率。

#### (8) 检查与测试

检查与测试是保证基板装配质量的重要步骤，采用 SMT 装配密度高，且两面均有元件，加之有些焊点被元器件覆盖，给测试工作带来一定的困难。若设计时考虑一些测试点，将可方便检测。装配后基板的测试，目前采用光学系统进行无机械触点测试，可靠性高，测试精度高；但价格昂贵。

### 14.4.2.2 SMT 印制板波峰焊工艺流程

在上述第三种 SMT 装配结构下，印制板采用波峰焊的工艺流程如图 14-77 所示。

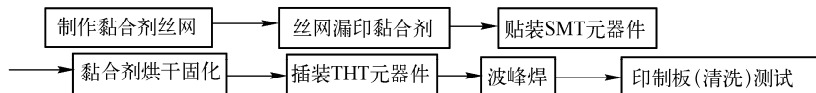


图 14-77 SMT 印制板波峰焊工艺流程

(1) 制作黏合剂丝网 按照 SMT 元器件在印制板上的位置，制作用于漏印黏合剂的丝网。

(2) 丝网漏印黏合剂 把黏合剂丝网覆盖在印制电路板上，漏印粘合剂。要精确保证黏合剂漏印在元器件的中心，尤其要避免黏合剂污染元器件的焊盘。如果采用点胶机或手工点涂黏合剂，则这两道工序要相应更改。

(3) 贴装 SMT 元器件 将 SMC/SMD 准确地贴放到 PCB 上印好焊锡膏或贴片胶的表面相

应位置上的过程,叫做贴装(贴片)。目前在国内的电子设备制造企业里,主要采用自动贴片机进行自动贴片,也可以采用手工方式贴片。手工贴片现在一般用在维修或小批量的试制生产中。

(4) 固化黏合剂 用加热或紫外线照射的方法,使黏合剂烘干、固化,使 SMT 元器件比较牢固地固定在印制板上。

(5) 插装 THT 元器件 把印制电路板翻转  $180^\circ$ , 在另一面插装传统的 THT 引线元器件。

(6) 波峰焊 与普通印制板的焊接工艺相同,用波峰焊设备进行焊接。在印制板焊接过程中, SMT 元器件浸没在熔融的锡液中。可见, SMT 元器件应该具有良好的耐热性能。假如采用双波峰焊接设备,则焊接质量会好很多。

(7) 印制板(清洗)测试 对经过焊接的印制板进行清洗,去除残留的助焊剂残渣(现在已经普遍采用免清洗助焊剂,除非是特殊产品,一般不必清洗)。最后进行电路检验测试。

#### 14.4.2.3 再流焊工艺

再流焊也叫做回流焊,是伴随微型化电子设备的出现而发展起来的锡焊技术。它主要应用于各类表面安装元器件的焊接。这种焊接技术的焊料是焊锡膏。预先在印制电路板的焊接部位施放适量

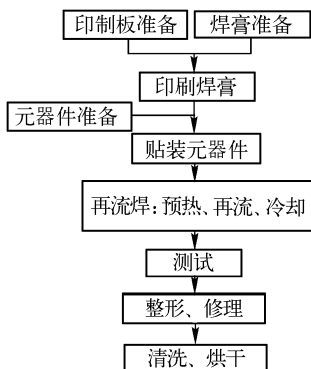


图 14-78 再流焊技术的一般工艺流程

和适当形式的焊锡膏,然后贴放表面组装元器件;焊锡膏将元器件粘在 PCB 板上,利用外部热源加热,使焊料熔化而再次流动浸润,将元器件焊接到印制板上。

再流焊操作方法简单,效率高、质量好、一致性好,节省焊料(仅在元器件的引脚下有很薄的一层焊料),是一种适合自动化生产的电子设备装配工艺技术。再流焊工艺目前已经成为 SMT 电路板安装技术的主流。

##### 1. SMT 印制板再流焊工艺流程

再流焊技术的一般工艺流程如图 14-78 所示。

印制板装配焊接采用再流焊工艺,涂敷焊料的典型方法之一是用丝网印刷焊锡膏,其流程如图 14-79 所示。

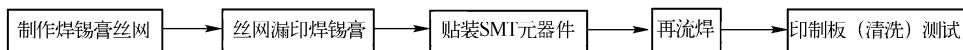


图 14-79 丝网印刷焊锡膏的再流焊工艺流程

(1) 制作焊锡膏丝网 按照 SMT 元器件在印制板上的位置及焊盘的形状,制作用于漏印焊锡膏的丝网。

(2) 丝网漏印焊锡膏 把焊锡膏丝网覆盖在印制电路板上,漏印焊锡膏,要精确保证焊锡膏均匀地漏印在元器件的电极焊盘上。

(3) 贴装 SMT 元器件 把 SMT 元器件贴装到印制板上,有条件的企业采用不同档次的贴装设备;在简陋的条件下也可以手工贴装。无论采用哪种方法,关键是使元器件的电极准确定位于各自的焊盘。

(4) 再流焊 用再流焊设备进行焊接,有关概念已经在前文中做过介绍。

(5) 印制板清洗及测试 根据产品要求和工艺材料的性质,选择印制板清洗工艺或免清洗工艺。最后对电路板进行检查测试。

如果是第二种 SMT 装配结构(双面混合装配),即在印制板的 A 面(元件面)上同时装有 THT 和 SMT 元器件,则先要对 A 面经过贴装和再流焊工序,然后,对印制板的 B 面(焊接面)用黏合剂



粘贴 SMT 元器件，翻转印制板并在 A 面插装引线元器件后，执行波峰焊工艺流程。

## 2. 再流焊工艺的特点与要求

### (1) 工艺特点

与波峰焊技术相比，再流焊工艺具有以下技术特点：

① 元件不直接浸渍在熔融的焊料中，所以元件受到的热冲击小（由于加热方式不同，有些情况下施加给元器件的热应力也会比较大）。

② 能控制焊料的施加量，减少了虚焊、桥接等焊接缺陷，所以焊接质量好，可靠性高。

③ 假如在 PCB 上施放焊料的位置正确而贴放元器件的位置有一定偏离，在再流焊过程中，当元器件的全部焊端、引脚及其相应的焊盘同时浸润时，由于熔融焊料表面张力的作用，产生自定位效应（self-alignment），能够自动校正偏差，把元器件拉回到近似准确的位置。

④ 再流焊的焊料是能够保证正确组分的焊锡膏，一般不会混入杂质。

⑤ 可以采用局部加热的热源，因而能在同一基板上采用不同的焊接方法进行焊接。

⑥ 工艺简单，返修的工作量很小。

在再流焊工艺过程中，首先要将由铅锡焊料、黏合剂、抗氧化剂组成的糊状焊膏涂敷到印制板上，可以使用自动或半自动丝网印刷机，如同油墨印刷一样将焊膏漏印到印制板上，也可以用手工涂敷。然后，同样也能用自动机械装置或手工，把元器件贴装到印制板的焊盘上。将焊膏加热到再流温度，可以在再流焊炉中进行，少量电路板也可以用手工热风设备加热焊接。当然，加热的温度必须根据焊膏的熔化温度准确控制（有些合金焊膏的熔点为  $223^{\circ}\text{C}$ ，则必须加热到这个温度）。加热过程可以分成预热区、焊接区（再流区）和冷却区三个最基本的温度区域，主要实现方法有两种：一种是沿着传送系统的运行方向，让电路板顺序通过隧道式炉内的三个温度区域；另一种是把电路板停放在某一固定位置上，在控制系统的作用下，按照三个温度区域的梯度规律调节、控制温度的变化。理想的再流焊的焊接温度曲线如图 14-80 所示。

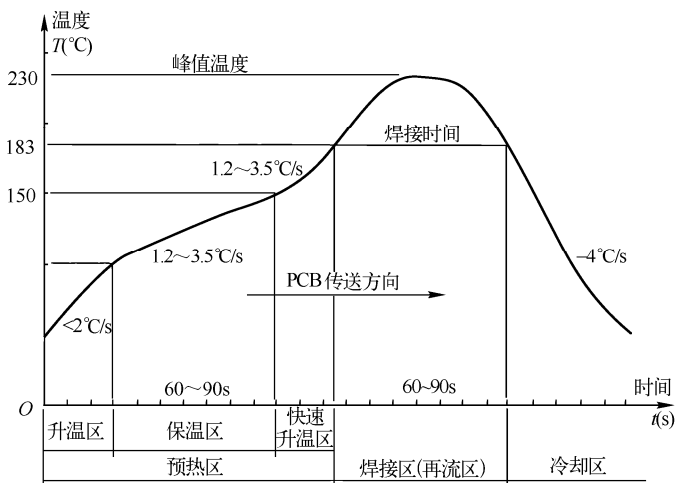


图 14-80 理想的再流焊的焊接温度曲线

### (2) 工艺要求

再流焊的工艺要求有以下几点：

① 要设置合理的温度曲线。再流焊是 SMT 生产中的关键工序，假如温度曲线设置不当，会引起焊接不完全、虚焊、元件翘立、锡珠飞溅等焊接缺陷，影响产品质量。

② SMT 电路板在设计时就要确定焊接方向，应当按照设计方向进行焊接。

③ 在焊接过程中，要严格防止传送带振动。

④ 必须对第一块印制电路板的焊接效果进行判断，适当调整焊接温度曲线。检查焊接是否完全、有无焊膏熔化不充分或虚焊和桥接的痕迹、焊点表面是否光亮、焊点形状是否向内凹陷、是否有锡珠飞溅和残留物等现象，还要检查 PCB 的表面颜色是否改变。在批量生产过程中，要定时检查焊接质量，及时对温度曲线进行修正。

14.4.2.4 SMT 电路板的组装方式比较

一般情况下，波峰焊适用于混合组装（第二、三种装配方式），再流焊适用于全表面组装（第一种装配方式）。表 14-23 比较了各种设备焊接 SMT 电路板的性能。

表 14-23 各种设备焊接 SMT 电路板的性能比较

焊接方法		初始投资	生产费用	生产效率	温度稳定性	工作适应性				
						温度曲线	双面装配	工装适应性	温度敏感元件	焊接误差率
再流焊	红外	低	低	中	取决于吸收	尚可	能	好	要屏蔽	夹持固定后焊接误差率低
	气相	中-高	高	中-高	极好	改变温度困难	能	很好	会损坏	中等
	热风	高	高	高	好	缓慢	不能	好	会损坏	很低
	热板	低	低	中-高	好	极好	不能	差	影响小	很低
	激光	高	中	低	要精确控制	实验确定	能	很好	极好	低
波峰焊		高	高	高	好	难建立	普通元件和 SMC 分装两面	不好	会损坏	高

14.4.2.5 清洗工艺、清洗设备和免清洗焊接方法

1. 清洗工艺和免清洗工艺

电路板在焊接以后，其表面或多或少会留有各种残留污物。为防止由于腐蚀而引起的电路失效，应该进行清洗，去除残留污物。但是，清洗工艺要消耗能源、人力和清洗材料，特别是清洗材料带来的废气、废水排放和环境污染，已经成为必须重视的问题。现在，除非是制造航天、航空类高可靠性、高精度产品，很多企业在一般电子设备的生产过程中，都改用了免清洗材料（主要是免清洗助焊剂）和免清洗工艺。

2. 残留污物的种类

仔细分析焊接后电路板上的残留污物，一般可以分为三大类。

（1）颗粒性残留污物，包括灰尘、絮状物和焊料球。灰尘、絮状物会吸附环境中的潮气和其他污物导致电路腐蚀；焊接时飞溅的焊料球在设备震动时可能聚集在一起，造成电路短路。

（2）极性残留污物，包括卤化物、酸和盐，它们来自助焊剂里的活化剂。极性残留污物会降低导体的绝缘电阻，并可能导致印制电路导线锈蚀。

（3）非极性残留污物，包括油脂、蜡和树脂残留物。非极性残留物的特性是绝缘的，虽然它们不会引起电路短路，但在潮湿的环境中会使电路板出现粉状或泡状腐蚀。

颗粒性残留污物，可以采用高压喷射或超声波等机械方式清除；而极性和非极性残留污物，应该使用溶剂在清洗设备中将其去除。

3. 溶剂的种类和选择

清除极性和非极性残留污物，要使用清洗溶剂。清洗溶剂分为极性和非极性溶剂两大类：极

性溶剂包括有酒精、水等,可以用来清除极性残留污物;非极性溶剂包括有氯化物和氟化物两种,如三氯乙烷、F-113 等,可以用来清除非极性残留污物。由于大多数残留污物是非极性和极性物质的混合物,所以,实际应用中通常使用非极性和极性溶剂混合后的溶剂进行清洗,混合溶剂由两种或多种溶剂组成。混合溶剂能直接从市场上购买,产品说明书会说明其特点和适用范围。

选择溶剂,除了应该考虑与残留污物类型相匹配以外,还要考虑一些其他因素,诸如去污能力、性能、与设备和元器件的兼容性、经济性和环保要求等。

#### 4. 水溶液清洗

水是一种成本较低且对多种残留污物都有一定清洗效果的溶剂,特别是在目前环保要求越来越高的情况下,有时只能使用水溶液进行清洗。水对大多数颗粒性、非极性和极性残留污物都有较好的清洗效果,但对硅脂、树脂和纤维玻璃碎片等电路板焊接后产生的不溶于水的残留污物没有效果。在水中加入碱性化学物质,如肥皂或胺等表面活性剂,可以改善清洗效果。除去水中的金属离子,将水软化,能够提高这些添加剂的效果并防止水垢堵塞清洗设备。因此,清洗设备中一般使用软化水。

#### 5. 免清洗焊接技术

对于一般电子设备,采用免清洗助焊剂并在制造过程中减少残留污物,例如,保持生产环境的清洁,工人戴手套操作避免油污、水汽沾染元器件和电路板,焊接时仔细调整设备和材料的工艺参数,这些措施都能减除清洗工序,实现免清洗焊接。但对于高精度、高可靠性产品,上述方法还不足以实现免清洗焊接,必须采取进一步的技术措施。

目前有两种技术可以实现免清洗焊接:一种是惰性气体焊接技术;另一种是反应气氛焊接技术。

##### (1) 惰性气体焊接技术

在惰性气体中进行波峰焊接和再流焊接,使 SMT 电路板上的焊接部位和焊料的表面氧化被控制到最低限度,形成良好的焊料润湿条件,再用少量的弱活性焊剂就能获得满意的效果。常用的惰性气体焊接设备,有开放式和封闭式两种。

开放式惰性气体焊接设备采用通道式结构,适用于波峰焊和连续式红外线再流焊。用氮气降低通道中的氧气含量,从而降低氧化程度,提高焊料润湿性能,提高焊接的可靠性。但开放式惰性气体焊接设备的缺点是要用到甲酸物质,会产生有害气体,而且其工艺复杂,成本高。

封闭式惰性气体焊接设备也采用通道式结构,只是在通道的进出口设置了真空腔。在焊接前,将电路板放入真空腔,封闭并抽真空,然后注入氮气,反复抽真空、注入氮气的操作,使腔内氧气浓度小于  $5 \times 10^{-6}$ 。由于氮气中原有氧气的浓度也小于  $3 \times 10^{-6}$ ,所以腔内总的氧气浓度小于  $8 \times 10^{-6}$ 。然后让电路板通过预热区和加热区。焊接完毕后,电路板被送到通道出口处的真空腔内,关闭通道门后,取出电路板。这样,整个焊接在全封闭的惰性气体中进行,不但可以获得高质量的焊接,而且可以实现免清洗。

封闭式惰性气体焊接可用于波峰焊、红外和强力对流混合的再流焊,由于在氮气中焊接,减少了焊料氧化,使润湿时间缩短,润湿能力提高,提高了焊接质量而且很少产生飞溅的焊料球,电路板极少污染和氧化。由于采用封闭式系统,能有效地控制氧气及氮气浓度。在封闭式惰性气体焊接设备中,风速分布和送风结构是实现均匀加热的关键。

##### (2) 反应气氛焊接技术

反应气氛焊接是将反应气氛通入焊接设备中,从而完全取消助焊剂的使用,反应气氛焊接技术是目前正在研究和开发中的技术。

## 第 15 章 电镀及塑料加工技术

### 15.1 电子设备电镀工艺技术

电镀，是指在含有施镀金属的盐类溶液中，以被镀基体金属为阴极，通过电解作用，使镀液中施镀金属的阳离子在基体金属表面沉积，形成镀层的一种表面加工方法。镀层性能不同于基体金属，具有新的特征。根据镀层的功能分为防护性镀层、装饰性镀层及其他功能性镀层。镀层的主要用途是保护金属零件表面以防止腐蚀；装饰零件外表，使外表美观；提高零件的工作性能。

#### 15.1.1 概述

##### 15.1.1.1 电镀工艺分类

###### 1. 按镀层组成分类

- (1) 单金属电镀 应用较广的镀层有锌、镉、铜、铬、锡、镍、金、银等。
- (2) 合金电镀 二元合金电镀常用的有锡-铅、锌-镍、锌-钴、铜-锡等合金；三元合金电镀常用的有铜-锡-锌、锌-镍-铁合金等；多元合金电镀基本处于研究阶段。
- (3) 复合电沉积 电镀层中嵌入固体颗粒形成复合镀层。

###### 2. 按获取镀层方式分类

- (1) 常规电镀 指挂镀、滚镀、电刷镀、脉冲电镀、电铸等。
- (2) 装饰性电镀 如镀金、银、铜、镍、装饰铬。
- (3) 防护性电镀 如镀锌。
- (4) 功能性电镀 如耐磨性电镀，如镀硬铬；提高可焊性电镀，如镀锡；增强导电性，如镀银、镀金。

##### 15.1.1.2 电镀设备和电镀液

###### 1. 挂具

方形挂具与方形镀槽配合使用，圆形挂具与圆形镀槽配合使用。圆形镀槽和挂具更有利于保证电流分布均匀；方形挂具则需在挂具周围加设诸如铁丝网之类的分散电流装置或缩短两侧阳极板的长度，使用椭圆形阳极排列。

###### 2. 搅拌装置

其作用是促进溶液流动，使溶液状态分布均匀，消除气泡在工件表面的停留。

###### 3. 电源

对电源的要求：直流，稳定性好，波纹系数小。

###### 4. 电镀液

###### (1) 分类

① 主盐。这是指镀液中能在阴极上沉积出所要求镀层金属的盐，用于提供金属离子。镀液中主盐浓度必须在一个适当的范围，主盐浓度增加或减少，在其他条件不变时，都会对电沉积过程及最后的镀层组织产生影响。比如，主盐浓度升高，电流效率提高，金属沉积速度加快，镀层晶粒较粗，溶液分散能力下降。

② 络合剂。有些情况下，若镀液中主盐的金属离子为简单离子时，则镀层晶粒粗大，因此，要采用络合离子的镀液。获得络合离子的方法是加入络合剂，即能络合主盐的金属离子形成络合物的物质。络合物，是一种由简单化合物相互作用而形成的“分子化合物”。在含络合物的镀液中，影响电镀效果的主要是主盐与络合剂的相对含量，即络合剂的游离量，而不是绝对含量。

③ 附加盐。这是指电镀中除主要盐外的某些碱金属或碱土金属盐类，其主要用于提高电镀液的导电性，对主盐中的金属离子不起络合作用。有些附加盐还能改善镀液的深镀能力、分散能力，产生细致的镀层。

④ 缓冲剂。它是指用来稳定溶液酸碱度的物质。这类物质一般是由弱酸和弱酸盐或弱碱和弱碱盐组成的，能使溶液遇到碱或酸时，溶液的 pH 值变化幅度缩小。

⑤ 阳极活化剂。镀液中能促进阳极活化的物质称为阳极活化剂。阳极活化剂的作用是提高阳极开始钝化的电流密度，从而保证阳极处于活化状态而能正常地溶解。阳极活化剂含量不足时阳极溶解不正常，主盐的含量下降较快，影响镀液的稳定。严重时，电镀不能正常进行。

⑥ 添加剂。它是指不会明显改变镀层导电性，而能显著改善镀层性能的物质。根据在镀液中所起的作用，添加剂可分为光泽剂、稳定剂、柔软剂、润湿剂、低区走位剂等。光泽剂又分为主光泽剂、载体光亮剂和辅助光泽剂等。

主盐与具体某一厂商的添加剂共同决定了所用镀液的整体性能。优秀的添加剂能弥补主盐某些性能的不足。如优秀的氯化物镀锌添加剂与氯化物主盐配合得到的镀液深镀能力比许多氰化镀锌镀液的深度能力要强。

### (2) 电镀液的分散能力

镀液的分散能力，是指电镀液所具有的使金属层厚度均匀分布的能力，也称为均镀能力。电镀液的分散能力越好，在不同阴极部位所沉积出的金属层厚度越均匀。

### (3) 电镀液的覆盖能力

在电镀生产中，常用到的另一个概念是覆盖能力，亦称深镀能力，它是指电镀液所具有的使镀件的深凹处沉积上金属镀层的能力。分散能力和覆盖能力不同，前者是说明金属在阴极表面分布均匀程度的问题，它的前提是在阴极表面都有镀层；而后者是指金属在阴极表面的深凹处有无沉积层的问题。

#### 15.1.1.3 电镀过程

##### 1. 电镀前的表面处理

施镀前的所有工序称为前处理，其目的是修整工件表面，除掉工件表面的油脂、锈皮、氧化膜等，为后续镀层的沉积提供所需的电镀表面。前处理主要影响受镀件的外观和结合力，据统计，60%的电镀不良品是由前处理不良造成的，所以前处理在电镀工艺中占有相当重要的地位。

##### 2. 电镀反应

###### (1) 电化学反应

被镀的零件为阴极，与直流电源的负极相连，金属阳极与直流电源的正极联结，阳极与阴极均浸入镀液中。当在阴、阳两极间施加一定电位时，则在阴极发生如下反应：从镀液内部扩散到

电极和镀液界面的金属离子  $M^{n+}$  从阴极上获得  $n$  个电子, 还原成金属  $M$ ; 另外, 在阳极则发生与阴极完全相反的反应, 即阳极界面上发生金属  $M$  的溶解, 释放  $n$  个电子生成金属离子  $M^{n+}$ 。

### (2) 法拉第定律

电流通过镀液时, 电解质溶液发生电解反应, 阴极上不断有金属析出, 阳极金属不断溶解。因此, 金属的析出(或溶解)量必定与通过的电荷有关。根据大量实验结果, 法拉第建立了析出(或溶解)的物质与电荷之间的关系的定律: 电极上析出(或溶解)物质的重量与进行电解反应时所通过的电荷成正比, 即

$$m = kQ = kIt \quad (15-1)$$

式中  $m$  为电极上析出或溶解物质的质量;  $Q$  为通过的电荷;  $k$  为比例常数;  $I$  为电流;  $t$  为通电时间。

电镀时, 阴极上实际析出的物质的质量并不等于根据法拉定律得到的计算结果, 实际值总小于计算值, 这是由于电极上的反应不只一个, 例如, 镀镍时, 在阴极上除发生这一主反应外, 还会发生副反应。

### (3) 电极电位

当金属电极浸入含有该金属离子的溶液中时, 存在如下的平衡, 即金属失去电子而溶解于溶液的反应和金属离子得到电子而析出金属的逆反应应同时存在, 即



平衡电位与金属的本性和溶液的温度、浓度有关。为了精确比较物质本性对平衡电位的影响, 人们规定当溶液温度为  $25^{\circ}\text{C}$ 、金属离子的浓度为  $1\text{mol/L}$  时, 测得的电位叫标准电极电位。标准电极电位负值较大的金属都易失掉电子被氧化, 而标准电极电位正值较大的金属都易得到电子被还原。

### (4) 极化

所谓极化, 是指有电流通过电极时, 电极电位偏离平衡电极电位的现象。所以, 又把电流-电位曲线称为极化曲线。产生极化作用的原因主要是电化学极化和浓差极化。

① 电化学极化。由于阴极上电化学反应速度小于外电源供给电子的速度, 从而使电极电位向负的方向移动而引起的极化作用。

② 浓差极化。由于邻近电极表液层的浓度与溶液主体的浓度发生差异而产生的极化, 称为浓差极化。这是由于溶液中离子扩散速度小于电子运动造成的。

## 3. 镀后处理

电镀后对镀层进行各种处理以增强镀层的各种性能, 如耐蚀性、抗变色能力、可焊性等。

### (1) 钝化处理

所谓钝化处理, 是指在一定的溶液中进行化学处理, 在镀层上形成一层坚实致密的、稳定性高的薄膜的表面处理方法。钝化使镀层耐蚀性大大提高并能增加表面光泽和抗污染能力。这种方法用途很广, 镀  $\text{Zn}$ 、 $\text{Cu}$  等后, 都可进行钝化处理。

### (2) 除氢处理

有些金属如锌, 在电沉积过程中, 除自身沉积出来外, 还会析出一部分氢, 这部分氢渗入镀层中, 使镀件产生脆性, 甚至断裂, 称为氢脆。对于高强度钢、弹性零件以及某些用于特殊条件下的零件(如飞机使用的零件), 在镀锌后都要经过除氢处理, 以防止发生氢脆现象, 其方法是在电镀后, 使镀件在一定的温度下热处理数  $h$ , 通过加热将氢从零件内部驱赶出去。

### (3) 其他处理

① 脱水处理。在水中添加脱水剂, 如镀亮镍后处理。

- ② 防变色处理。水中添加防变色药剂,如镀银、镀锡、镀仿金等。
- ③ 提高可焊性处理。如镀锡。

#### 15.1.1.4 影响电镀质量的因素

影响电镀质量的因素很多,包括镀液的各种成分以及各种电镀工艺参数。下面就其中某些主要因素进行讨论。

(1) pH 值的影响 镀液中的 pH 值可以影响氢的放电电位、碱性夹杂物的沉淀,还可以影响络合物或水化物的组成以及添加剂的吸附程度。但是,对各种因素的影响程度一般不可预见。最佳的 pH 值往往要通过试验来确定。在含有络合剂离子的镀液中,pH 值可能影响存在的各种络合物的平衡,因而必须根据浓度来考虑。电镀过程中,若 pH 值增大,则阴极效率比阳极效率高;pH 值减少,则反之。通过加入缓冲剂可以将 pH 值稳定在一定的范围。

(2) 添加剂的影响 镀液中的光亮剂、整平剂、润湿剂等添加剂能明显改善镀层组织。添加剂有无机和有机之分。无机添加剂起作用的原因是由于它们在电解液中形成高分散度的氢氧化物或硫化物胶体,吸附在阴极表面阻碍金属析出,因而提高阴极极化作用。有机添加剂起作用的原因是这类添加剂多为表面活性物质,它们会吸附在阴极表面形成一层附膜,阻碍金属析出,因而提高阴极极化作用。另外,某些有机添加剂在电解液中形成胶体,会与金属离子络合形成胶体-金属离子型络合物,阻碍金属离子放电而提高阴极极化作用。

(3) 电流密度的影响 任何电镀都必须有一个能产生正常镀层的电流密度范围。当电流密度过低时,阴极极化作用较小,镀层晶粒粗大,甚至没有镀层。随着电流密度的增加,阴极极化作用随之增加,镀层晶粒越来越细。当电流密度过高,超过极限电流密度时,镀层质量开始恶化,甚至出现海绵体、枝晶状、烧焦及发黑等。电流密度变化的上限和下限是由电镀液的本性、浓度、温度和搅拌等因素共同决定的。一般情况下,主盐浓度增大、镀层温度升高以及有搅拌的条件下,可以允许采用较大的电流密度。

(4) 电流波形的影响 电流波形的影响是通过阴极电位和电流密度的变化来影响阴极沉积过程的,它进而影响镀层的组织结构,甚至成分,使镀层性能和外观发生变化。实践证明,三相全波整流和稳压直流相当,对镀层组织几乎没有什么影响,而其他波形则影响较大。

(5) 温度的影响 镀液温度的升高能加快扩散,降低浓差极化。此外,升温还能使离子的脱水过程加快。离子和阴极表面活性增强,也降低了电化学极化,导致结晶变粗。另外,温度升高能增加盐类的溶解度,从而增加导电和分散能力;还可以提高电流密度上限,从而提高生产效率。

(6) 搅拌的影响 搅拌可降低阴极极化,使晶粒变粗,但可提高电流密度,从而提高生产效率。此外搅拌还可增强整平剂的效果。

#### 15.1.1.5 镀层性能测试

##### 1. 电镀层外观检验

金属零件电镀层的外观检验是最基本、最常用的检验方法。外观不合格的镀件就无须进行其他项目的测试。检验时用目力观察,按照外观可将镀件分为合格的、有缺陷的和废品三类。外观不良包括有针孔、麻点、起瘤、起皮、起泡、脱落、阴阳面、斑点、烧焦、暗影、树枝状和海绵状沉积层以及应当镀覆而没有镀覆的部位等缺陷。

##### 2. 结合力试验

镀层结合力,是指镀层与基体金属的结合强度,即单位面积的镀层从基体金属上剥离所需要

的力。镀层结合力不好,多数原因是镀前处理不良所致。另外,镀液成分与工艺规范不当均对镀层结合力有明显影响。

评定镀层与基体金属结合力通常采用定性方法。车间定性测量法,是以镀层金属和基体金属的物理-机械性能的不同为基础,即当试样经受不均匀变形、热应力和外力的直接作用后,检查镀层是否有结合不良的现象。具体方法可根据镀种和镀件选定弯曲试验、锉刀试验、划痕试验等。

### 3. 电镀层厚度的测量

电镀层厚度的测量方法有破坏检测法与非破坏检测法两大类。其中,破坏检测法有点滴法、液流法、溶解法、电量法和金相显微法等多种;非破坏检测法有磁性法、涡流法、 $\beta$ 射线反向散射法和光切显微镜法等。测量时除溶解法等是镀层的平均厚度外,其余多数是镀层的局部厚度。因此,测量时至少应在有代表性部位测量三个以上厚度,计算其平均值作为测量厚度的结果。

### 4. 孔隙率的测定

镀层的孔隙,是指镀层表面直至基体金属的细小孔道。孔隙大小影响镀层的防护能力。测定孔隙的方法有贴滤法、涂膏法、浸渍法等。

(1) 贴滤纸法 将浸有测试溶液的润湿纸贴于经预处理的被测试件上,滤纸上的试液渗入孔隙中与中间镀层或基体金属发生作用,生成具有颜色的斑点在滤纸上显示。然后以滤纸上有色斑的多少来评定镀层孔隙率。

(2) 涂膏法 将含有相应试液的膏状物涂覆于被测试样上,通过泥膏中的试液渗入镀层孔隙与基体金属或中间镀层发生作用,生成具有特征颜色的斑点,据此斑点来评定镀层的孔隙率。

(3) 浸渍法 将试样浸于相应试液中,试液渗入镀层孔隙与基体金属或中间镀层发生作用,在镀层表面产生有色斑点,然后检查镀层表面有色斑点多少来评定镀层的孔隙率。本法适用于检验钢铁、铜或铜合金和铝合金基体表面的阴极性镀层的孔隙率。

### 5. 镀层显微硬度的测定

硬度是镀层的重要机械性能之一,镀层金属的结晶组织决定镀层的硬度。显微硬度法即采用显微硬度计上特制的金刚石压头,在一定静负荷的作用下,压入试样的镀层表面或剖面,获得相应正角锥体压痕。然后用硬度上测微目镜将压痕放大一定倍率,测量压痕对角线的长度。

### 6. 镀层内应力的测试

镀层内应力,是指在没有外在载荷的情况下,镀层内部所具有的一种平衡应力。用来测量镀层宏观应力的方法有幻灯投影法、电阻应变仪法、螺旋收缩仪法、X射线衍射法等多种。

### 7. 镀层脆性测试

镀层脆性是镀层物理性能中的一项重要指标。脆性的存在往往会导致镀层开裂,结合力下降,乃至直接影响镀件的使用价值。镀层脆性的测试,一般通过试样在外力作用下使之变形,直至镀层产生裂纹,然后以镀层产生裂纹时的变形程度或挠度值大小,作为评定镀层脆性的依据。测定镀层脆性的方法有杯突法、静压挠曲法等。测定镀层韧性的方法有心轴弯曲法等。

### 8. 氢脆性的测试

金属材料在氢和应力联合作用下产生的早期脆断现象叫氢脆。测定氢脆的方法有:延迟破坏试验、缓慢弯曲试验等方法。

(1) 延迟破坏试验 此法适合于超高强度钢的氢脆试验,是一种灵敏而可靠的试验方法。试验时,将做成的三根缺口棒状试样放在持久强度试验机或蠕变试验机上,在材料脆断的时间,若三根平行试验的试样在规定的时间内均不脆断,即为合格。

(2) 缓慢弯曲试验 此法对低脆性材料比较灵敏。测试时应注意:试片在热处理后如果变



形,应静压校平;镀前应消除应力,镀后要严格除氢;试前应选足够数量的试样材料进行空白试验,便于分析试验结果和选择合适的折断轴直径。

(3) 挤压试验 将需检验的垫圈套在同一直径的螺杆上,每一螺杆套 10~15 个,螺杆两端旋上螺母,然后夹在虎钳上,用扳手将螺母旋紧到垫圈开口处挤平,保持 24h,然后松开,用 5 倍放大镜检查受试垫圈产生的裂纹和断裂。结果以脆断率表示为

$$\text{脆断率} = b/a(\%) \quad (15-3)$$

式中  $a$ ——受试垫圈总数; $b$ ——产生裂纹或断裂垫圈的个数。

### 9. 镀层焊接性能的测试

镀层焊接性,是表示焊锡在待焊金属表面流动的难易程度。评定镀层焊接性的方法有流布面积法、润湿时间法和蒸汽考验法。

(1) 流布面积法 此法将一定质量的焊料放在待测试样表面上,滴上几滴松香异丙醇剂,放在加热板上加热至 250℃,保持 2min,取下试样,然后用面积仪检查计算焊料涂布面积。流布面积越大,镀层焊接性能越好。

(2) 润湿时间法 此法是通过熔融焊料对规定试样全部润湿的时间来区别焊接性。测试时,将 10 块一定规格的试样先浸以松香丙醇焊剂,再浸入 250℃的熔融焊料中,浸入时间根据 10 块不同编号的试样,分别浸入 1~10s,然后立即取出。冷却后检查试样是否全部被润湿,以全部被润湿的试样的最短时间,评定镀层焊接性能。一般以 2s 为内全部润湿为好,10s 润湿为最差。

(3) 蒸汽考验法 此法是将试样放在水面上部(须防盖上的冷凝水滴在试样表面而影响测试),试样与沸水相距 100mm,与顶盖相距 50mm。经过 24h 后,不管试样变色与否,让试样在空气中干燥,然后用流布面积法或润湿时间法测试,根据结果评定合格与否。

## 15.1.2 金属镀前表面处理技术

### 15.1.2.1 钢铁电镀前表面处理

#### 1. 除油脂

除油脂的目的在于清除掉工件表面的油脂、油污。以下介绍化学法除油脂工艺。

##### (1) 强碱液清洗

用强碱液除油脂是一种有效的传统方法。它是利用强碱对动植物油的皂化反应,形成溶于水的皂化物达到去除油脂的目的。纯粹的强碱液只能皂化除掉动、植物油脂而不能除掉矿物油脂。因此人们通过在强碱液中加入表面活性剂,一般是磺酸类阴离子活性剂,利用表面活性剂的乳化作用达到去除矿物油的目的。强碱液除油脂的使用温度都较高,常用强碱液清洗配方与工艺见表 15-1。

强碱液除油脂需要较高温度,能耗大,对设备腐蚀性也大,并且材料成本并不算低,因而这种方法的应用正逐步减少。

##### (2) 溶剂乳化清洗

乳化液一般由有机溶剂、表面活性剂和水组成,其工作液一般为乳白色乳液。它利用有机溶剂溶解油脂,表面活性剂乳化油脂,因而除油速度较快。乳化清洗一般总有一些残留薄油膜,如

表 15-1 常用强碱液清洗配方与工艺

氢氧化钠	5%~10%
硅酸钠	2%~8%
磷酸钠(或碳酸钠)	1%~10%
表面活性剂(磺酸类)	2%~5%
处理温度	>80℃
处理时间	5~20min
处理方式	浸泡、喷淋均可

果作为涂装，还需用碱性清洗剂再洗一次，如果用于防锈目的时，可直接存放。

(3) 低碱性清洗液清洗

低碱性清洗液是当前应用最为广泛的一类除油脂剂。它的碱性低，pH 值一般为 9~12；对设备腐蚀较小，对工件表面状态破坏小，可在低温和中温下使用，除油脂效率较高。特别在喷淋方式使用时，除油脂效果特别好。

表 15-2 常用的低碱性清洗液配方和工艺

	浸泡型	喷淋型
三聚磷酸钠	4~10g/L	4~10g/L
硅酸钠	0~10g/L	0~10g/L
碳酸钠	4~10g/L	4~10g/L
表面活性剂	5~20g/L	1~3g/L
消泡剂	0	0.5~3.0g/L
表面调整剂	0~3g/L	0~3g/L
游离碱度	5~20 点	5~15 点
处理温度	20~80℃	40~70℃
处理时间	5~20min	1.5~3.0min

低碱性清洗剂主要由无机低碱性助剂、表面活性剂、消泡剂等组成。无机型助剂主要有硅酸钠、三聚磷酸钠、磷酸钠、碳酸钠等。其作用是提供一定的碱度，有分散悬浮作用。可防止脱下来的油脂重新吸附在工件表面。表面活性剂主要采用非离子型与阴离子型，一般有聚氯乙烯类和磺酸盐型，在除油脂过程中它们起主要的作用。在有特殊要求时还需要加入一些其他添加物，如喷淋时需要加入消泡剂，有时还加入表面调整剂，起到脱脂、表面调整双重作用。低碱性清洗剂已有很多商业化产品，常用的低碱性清洗液配方和工艺见表 15-2。

浸泡型清洗剂主要应注意的是表面活性剂的浊点问题，当处理温度高于浊点时，表面活性剂析出上浮，使之失去脱脂能力，一般加入阴离子型活性剂即可解决。喷淋型清洗剂应加入足够的消泡剂，在喷淋时不产生泡沫尤为重要。

对铝件、锌件清洗时，必须考虑到它们在碱性条件下的腐蚀问题，一般宜用接近中性的清洗剂。

(4) 溶剂清洗

用溶剂法除油脂，一般是用有机溶剂清洗或是非易燃的卤代烃蒸汽法。最常见的是采用三氯乙烷、三氯乙烯、全氯乙烯蒸汽除油脂。蒸汽脱脂速度快，效率高，脱脂干净彻底，对各类油及脂的去除效果都非常好。在氯代烃中，不管是浸泡法还是蒸气法效果都很好。由于溶剂的危险性以及氯代卤都有一定的毒性，汽化温度也较高，溶剂法以及溶剂蒸汽方法现在已经很少使用了。

(5) 酸性清洗剂清洗

酸性清洗剂除油脂是一种应用非常广泛的方法。它利用表面活性剂的乳化、润湿、渗透原理，并借助于酸腐蚀金属产生氢气的机械剥离作用，达到除油脂的目的。酸性清洗剂可在低温和中温下使用。低温一般只能除掉液态油，中温就可除掉油和脂，一般只适合于浸泡处理方式。酸性清洗剂主要由表面活性剂（如聚氧乙烯酚醚类非离子型活性剂、阴离子磺酸钠型）、普通无机酸、缓蚀剂三大部分组成。由于它兼备有除锈与除油脂双重功能，人们习惯称之为“二合一”处理液。常见的酸性清洗剂配方及工艺参数见表 15-3。

表 15-3 常见的酸性清洗剂配方及工艺

工 艺	低 温 型	中 温 型	磷酸根基型
工业盐酸（31%）	20%~50%	0	0
工业硫酸（98%）	0%~15%	15%~30%	0
工业磷酸（85%）	0	0	10%~40%
表面活性剂(非离子类, 磺酸类)	0.4%~1.0%	0.4%~1.0%	0.4%~1.0%
缓蚀剂	适量	适量	适量
使用温度	20~45℃	50~80℃	20~80℃
处理时间	适当	5~10min	适当

盐酸、硫酸酸基的清洗剂应用最为广泛，成本低，效率较高。但酸洗残留的  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  对工件的后腐蚀危害很大。而磷酸酸基没有腐蚀物残留的隐患，但磷酸成本较高，清洗效率低些。锌件在酸中的腐蚀极快，对于锌件一般不采用酸性清洗剂清洗。

## 2. 除锈

### (1) 化学除锈

酸洗除锈、除氧化皮的方法是工业领域应用最为广泛的方法。利用酸对氧化物溶解以及腐蚀产生氢气的机械剥离作用达到除锈和除氧化皮的目的。酸洗中使用最为常见的是盐酸、硫酸、磷酸。硝酸由于在酸洗时产生有毒的二氧化氮气体，一般很少使用。盐酸酸洗适合在低温下使用，不宜超过 45℃，使用浓度 10%~45%，还应加入适量的酸雾抑制剂为宜。硫酸在低温下的酸洗速度很慢，宜在中温使用，温度 50~80℃，使用浓度 10%~25%。磷酸酸洗的优点是不会产生腐蚀性残留物（盐酸、硫酸酸洗后或多或少会有  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  残留），比较安全，但磷酸的缺点是成本较高，酸洗速度较慢，一般使用浓度 10%~40%，处理温度范围可在常温到 80℃。在酸洗工艺中，采用混合酸也是非常有效的方法，如盐酸-硫酸混合酸，磷酸-柠檬酸混合酸。

在酸洗除锈除氧化皮槽液中，必须加入适量的缓蚀剂。缓蚀剂的种类很多，选用也比较容易，它的作用是抑制金属腐蚀和防止“氢脆”。但酸洗“氢脆”敏感的工件时，缓蚀剂的选择应特别小心，因为某些缓蚀剂抑制二个氢原子变为氢分子的反应，即  $2[\text{H}] \rightarrow \text{H}_2 \uparrow$ ，使金属表面氢原子的浓度提高，增强了“氢脆”倾向。因而必须查阅有关腐蚀数据手册，或做“氢脆”试验，避免选用危险的缓蚀剂。

### (2) 机械除锈

手工、电动工具；喷砂抛丸。

## 3. 中和

中和的目的是中和掉工件上的残酸，使清洗更加干净，根据工件形状、输送方式等实际情况，选择采用中和或不采用中和工序。采用中和时，大多使用低浓度的纯碱或烧碱水溶液，浓度一般在 2% 以下。

## 4. 表面调整

表面调整的目的在于促使磷化形成晶粒细致密实的磷化膜，以及提高磷化速度。表面调整剂主要有两种：一种是酸性表面调整剂，如草酸；另一种是胶体钛。两者的应用都非常普及，前者还兼有除轻锈（工件运行过程中形成的“水锈”及“风锈”）的作用。在磷化前处理工艺中，是否选用表面调整工序是由工艺与磷化膜的要求来决定的。一般原则是：涂漆前打底磷化和快速低温磷化都需要表面调整。如果工件在进入磷化槽时，已经二次生锈，最好采用酸性表面调整。

## 5. 磷化

将金属置于含有磷酸盐的溶液中进行处理，以形成金属磷酸盐化学转化膜，这一工艺过程称为磷化，所形成的金属磷酸盐转化膜称为磷化膜。漆前磷化的主要目的是：给基体金属提供短期工序间保护，在一定程度上防止金属被腐蚀；提高漆膜层的附着力与防腐蚀能力。

### (1) 基本原理

磷化过程包括化学与电化学反应。磷化成膜过程主要是由如下 4 个步骤组成：

① 酸的浸蚀使基体金属表面  $\text{H}^+$  浓度降低。



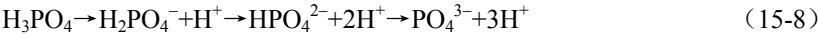
② 促进剂（氧化剂）加速界面的  $\text{H}^+$  浓度降低。



由于促进剂氧化掉第一步反应所产生的氢原子，加快了反应（15-5）的速度，进一步导致金

属表面  $H^+$  浓度急剧下降。同时也将溶液中的  $Fe^{2+}$  氧化成为  $Fe^{3+}$ 。

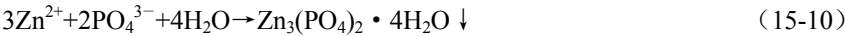
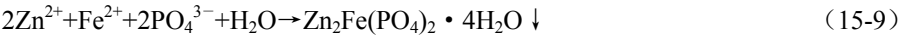
③ 磷酸根的多级离解。



由于金属表面的  $H^+$  浓度急剧下降，导致磷酸根各级离解平衡向右移动，最终会离解出  $PO_4^{3-}$ 。

④ 磷酸盐沉淀结晶成为磷化膜。

当金属表面离解出的  $PO_4^{3-}$  与溶液中（金属界面）的金属离子（如  $Zn^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ ）达到溶度积常数  $K_{sp}$  时，就会形成磷酸盐沉淀，磷酸盐沉淀结晶成为磷化膜。



磷酸盐沉淀与水分子一起形成磷化晶核，晶核继续长大成为磷化晶粒，无数个晶粒紧密堆集形成磷化膜。

(2) 磷化分类

① 按磷化膜厚度（膜重）分类（见表 15-4）。

表 15-4 按磷化膜厚度（膜重）分类

分 类	膜重 (g/m <sup>2</sup> )	膜 的 组 成	用 途
次轻量级	0.2~1.0	主要由磷酸铁、磷酸钙或其他金属的磷酸盐所组成	用作较大形变钢铁工件的涂装底层或耐蚀性要求较低的涂装底层
轻量级	1.1~4.5	主要由磷酸锌和（或）其他金属的磷酸盐所组成	用作涂装底层
次重量级	4.6~7.5	主要由磷酸锌和（或）其他金属的磷酸盐所组成	可用作基本不发生形变钢铁工件的涂装底层
重量级	>7.5	主要由磷酸锌、磷酸锰和（或）其他金属的磷酸盐组成	不宜作涂装底层

② 按磷化成膜物质分类。按磷化成膜体系主要分为锌系、锌钙系、锌锰系、锰系、铁系、非晶相铁系六大类。

a. 锌系。磷化槽液主体成份是  $Zn^{2+}$ 、 $H_2PO_3^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $H_3PO_4$  和促进剂等。形成的磷化膜主体组成（钢铁件）： $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 、 $Zn_2Fe(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 。磷化晶粒呈树枝状、针状、孔隙较多。广泛应用于涂漆前打底、防腐蚀。

b. 锌钙系。磷化槽液主体成分是  $Zn^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $NO_3^-$ 、 $H_2PO_4^-$ 、 $H_3PO_4$  以及其他添加物等。形成磷化膜的主体组成（钢铁件）： $Zn_2Ca(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 、 $Zn_2Fe(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 、 $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 。磷化晶粒呈紧密颗粒状（有时有大的针状晶粒），孔隙较少。应用于涂漆前打底及防腐蚀。

c. 锌锰系。磷化槽液主体成分是  $Zn^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$ 、 $NO_3^-$ 、 $H_2PO_4^-$ 、 $H_3PO_4$  以及其他一些添加物。磷化膜主体组成： $Zn_2Fe(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 、 $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 、 $Mn_5H_2(PO_4)_4 \cdot 4H_2O$ 。磷化晶粒呈颗粒-针状-树枝状混合晶型，孔隙较少。广泛用于漆前打底、防腐蚀。

d. 锰系。磷化槽液主体组成： $Mn^{2+}$ 、 $NO_3^-$ 、 $H_2PO_4^-$ 、 $H_3PO_4$  以及其他一些添加物。在钢铁件上形成磷化膜主体组成： $Mn_3H_2(PO_4)_4 \cdot 4H_2O$ 。磷化膜厚度大、孔隙少，磷化晶粒呈密集颗粒状。广泛应用于防腐蚀。

e. 铁系。磷化槽液主体组成： $Fe^{2+}$ 、 $H_2PO_4^-$ 、 $H_3PO_4$  以及其他一些添加物。磷化膜主体组成（钢铁工件）： $Fe_5H_2(PO_4)_4 \cdot 4H_2O$ ，磷化膜厚度大，磷化温度高，处理时间长，膜孔隙较多，磷化晶粒呈颗粒状。应用于防腐蚀。

f. 非晶相铁系。磷化槽液主体成分： $\text{Na}^+$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、 $\text{H}_3\text{PO}_4$ 、 $\text{ClO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 以及其他一些添加剂。磷化膜主体组成（钢铁件）： $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，磷化膜薄，微观膜结构呈非晶相的平面分布状，仅应用于涂漆前打底。

③ 按磷化处理温度分类。按处理温度可分为常温、低温、中温、高温四类。常温磷化就是不加热磷化。低温磷化一般处理温度  $25 \sim 45^\circ\text{C}$ 。中温磷化一般  $60 \sim 70^\circ\text{C}$ 。高温磷化一般大于  $80^\circ\text{C}$ 。

④ 按促进剂类型分类。促进剂主要分为硝酸盐型、亚硝酸盐型、氯酸盐型、有机氮化物型、钼酸盐型等主要类型。每一个促进剂类型又可与其他促进剂配套使用，有不少分支系列。

磷化分类方法还有很多，如按材质可分为钢铁件、铝件、锌件以及混合件磷化等。

### （3）常用磷化工艺

① 对于无锈蚀工件。

a. 除油脂→水洗→磷化→水洗→（钝化→水洗）干燥或直接电泳。

b. 除油脂→水洗→表面调整→磷化→水洗→（钝化→水洗）干燥或直接电泳。

② 对于有锈蚀工件。

a. 除油脂→水洗→酸洗除锈→水洗→（中和）→表面调整→磷化→水洗→（钝化→水洗）干燥或直接电泳。

b. 除油除锈“二合一”→水洗→（中和）→表面调整→磷化→水洗→（钝化→水洗）干燥或直接电泳。

#### 15.1.2.2 铝件锌件表面前处理

铝件常规涂装前处理工艺为：

（1）上件→除油脱脂→水洗→碱蚀→水洗→（硝酸出光→水洗）→化学氧化磷化→水洗→烘干→冷却→涂装。

（2）上件→除油脱脂→水洗→碱蚀→水洗→（硝酸出光→水洗）→表面调整→磷化→水洗→烘干→冷却→涂装。

由于铝是两性金属，用酸性、碱性处理剂均可除油。铝件除氧化皮是碱腐蚀工艺，一般用  $\text{NaOH}$ 。锌件除油、除白锈基本是在碱性溶液中进行，常用低碱性除油、高碱除白锈。

#### 15.1.2.3 镀前表面处理的有关标准

镀前表面处理的有关标准见表 15-5。

表 15-5 镀前表面处理的有关标准

序 号	标 准 名 称	标 准 号
1	涂装前表面准备——酸洗	JB/T 6978—1993
2	钢铁工件涂漆前磷化处理技术条件	GB/T 6807—1986
3	金属的磷酸盐转化膜	GB/T 11376—1997
4	化学转化膜铝及铝合金上漂洗和不漂洗铬酸盐转化膜	GB/T 17460—1998
5	金属材料上的转化膜单位面积上膜层质量的测定重量法	GB/T 9792—1988
6	钢铁件涂装前除油程度检验方法（验油试纸法）	GB/T 13312—1991
7	涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级	GB/T 8923—1988
8	多功能钢铁表面处理液通用技术条件	GB/T 12612—1990
9	涂装前钢材表面粗糙度等级的评定（比较样块法）	GB/T 13288—1991

### 15.1.3 电子设备常用电镀工艺

#### 15.1.3.1 镀锌工艺

镀锌层是钢铁的优良防护性镀层，属阳极性镀层。镀锌电解液可分为碱性和弱酸性两大类，国内外常用的有无氰锌酸盐镀锌、氰化镀锌、铵盐镀锌、氰化物镀锌、硫酸盐镀锌等。就国内而言，由于镀锌添加剂性能的改进提高，氰化物镀锌和低氰光亮镀锌发展较快，而铵盐镀锌则继续萎缩。

##### 1. 镀锌工艺的种类

选择镀液要根据镀件材质、形状、外观要求而定，如冲压小件和复杂件，特别是需要辅助阳极的深孔或管状件宜选用碱性镀液；对氢脆敏感的零件宜用弱酸性镀锌液。

##### (1) 锌酸盐镀锌

锌酸盐镀液，其成分是氧化锌（纯度大于 98%）、氢氧化钠、DE 和 DPE 添加剂、光亮剂和水。锌酸盐镀液的特点：不用剧毒的氰化物，废水易处理；镀层结晶细密，光泽好，分散能力和深镀能力接近氰化镀液，适合复杂形状的零件电镀；镀液稳定，操作方便；对设备无腐蚀性；综合经济效益好。

这种镀液沉积速度慢，允许温度范围窄（高于 40℃ 不好），铸锻件较难电镀，工作时会产生刺激性气体逸出，必须安装通风装置。主添加剂和光亮剂靠经验补加。

##### (2) 氰化镀锌

氰化镀锌的镀液组成是氧化锌、氰化钠、氢氧化钠、氰化镀锌光亮剂。氰化镀锌分散能力和深镀能力好，结晶细密，与基体结合力好，耐蚀性能好，工艺范围宽，镀液稳定易操作，对杂质不太敏感。但是剧毒，现在大部分场合应用无氰镀锌，或低氰镀锌。

##### (3) 铵盐镀锌

从氯化铵-氨羧络合剂镀锌电解液中沉积的锌层，结晶细致，镀层光泽美观，分散能力和深镀能力好，适合于复杂零件的电镀。但在生产中发现该类镀液钝化膜易变色，镀液腐蚀性大，废水中重金属难处理，因氨对鱼类有毒，后逐渐被锌酸盐镀锌所取代。

##### (4) 氯化物镀锌

氯化物镀锌镀液成分是氯化锌、氯化钾、硼酸、添加剂（主光亮剂，载体光亮剂，辅助光亮剂）。氯化物镀液是不含络合剂的单盐镀液，废水极易处理；镀层的光亮性和整平性优于其镀液体系；电流效率高，沉积速度快；高碳钢、铸件、锻件等容易施镀。

##### (5) 硫酸盐镀锌

在硫酸盐镀锌镀液组成中，硫酸锌是主盐；硫酸钠、氯化铵是导电盐；硫酸铝、明矾和硼酸是缓冲剂；糊精为细化结晶，用来提高分散能力。硫酸盐镀锌的分散能力比前述几种镀锌溶液差些，且结晶较粗；为改善镀液性能，引入阿拉伯树胶或天然桃胶，对细化结晶有效果，但货源不足。为此近来国内外电镀工作者开发了由芳香族醛或酮磺酸盐、聚醚化合物和芳香族磺酸盐组合的光亮剂，使镀液和镀层性能大为改善，镀层细致、光亮。这种镀液成本低，电流效率高，可使用很高的电流密度，沉积速度快，适合于电镀外形简单的线材、带材、板材和管材的内壁。镀液的 pH 值较低，有的还有氯化物，所以对设备有腐蚀性。

##### 2. 镀锌常见故障及纠正方法

镀锌常见故障及纠正方法见表 15-6。

表 15-6 镀锌常见故障及纠正方法

故障现象	可能产生的原因	纠正方法
镀层粗糙，灰暗溶液混蚀	电流密度过高 pH 值太高 缓冲剂不足 光亮剂不足	降低电流密度 降低 pH 值 按分析补加缓冲剂 增加光亮剂
沉积速度慢	锌含量低 pH 值低 导电盐不足 电流密度低	增加锌阳极 提高 pH 值 增加导电盐 提高电流密度
镀层有灰斑，低电流区更多	电流密度低 光亮剂不足 pH 值太高 金属杂质太多	提高电流密度 添加光亮剂 降低 pH 值 用锌粉处理或低电流密度电解
镀层易烧焦，电流密度提不高	锌浓度低 pH 值太高 导电盐少 光亮剂不足	分析补充 降低 pH 值 分析补充 添加光这剂
干燥后零件表面有“白霜”	镀后清洗不净	加强镀后清洗

3. 镀锌后除氢处理

钢铁零件镀锌过程中，除了锌的电沉积，往往伴随有氢离子还原析氢的副反应，即氢还原后一部分变成气体逸出，还有一部分以氢的原子形态渗入到镀层和基体金属晶格的点阵中去，造成晶格歪扭，零件内应力增加，镀层和基体变脆。采用加热处理法可将氢从零件内部赶出去，这称为除氢。除氢效果与除氢温度、保温时间有关。温度高、时间长，除氢越彻底。但加热温度不能太高，超过 250℃ 锌结晶组织变形、发脆，耐蚀性明显下降。一般采用 190~230℃，2~3h。渗碳件和锡焊件除氢温度是 140~160℃，保温 3h。

4. 锌镀层的钝化处理

锌的化学性质活泼，在大气中容易氧化变暗，最后产生白锈腐蚀。镀锌之后经过铬酸盐处理，可在锌上覆盖一层化学转化膜，使活泼的金属处于钝态，这就叫铬酸盐钝化处理。膜厚 0.5μm 能使锌的耐蚀性提高 6~8 倍，并赋予锌以美丽的外观和抗污染能力。

钝化膜从外观可分为白色、淡蓝色、彩虹色、金黄色、黑色、军绿色。这些钝化膜耐蚀强弱的顺序是军绿色>黑色>彩虹色>金黄色>淡蓝色>白色。所以，凡用于耐蚀目标机械零件镀锌都必须进行彩虹色钝化。

钝化液依浓度可分为高浓度、中浓度、低浓度三种。由于钝化中生产消耗铬酸不足 5%，而 95% 被零件带出损失，造成严重的环境污染。采用低浓度钝化液可降低生产成本，减轻污染。

15.1.3.2 镀镍工艺

1. 普通镀镍（暗镀）

普通电镀又称暗镍工艺，根据镀液的性能和用途，普通镀镍可以分为低浓度的预镀液、普通镀液、瓦特液等。

预镀液：经预镀可保证镀层与铜铁基体和随后的镀铜层结合良好。

普通镀液：该镀液的导电性好，可在较低温度下电镀，节省能源，使用比较方便。

瓦特液：满足小零件的电镀，但镀液必须要有良好的导电性和覆盖能力。

（1）镀液配制方法

根据容积计算好所需要的化学药品，分别用热水溶解，混合在一个容器中，加蒸馏水稀释到

所需体积，静置澄清，用虹吸法或过滤法把镀液引入镀槽，再加入已经溶解的硫酸钠溶液，搅拌均匀，取样分析，经调整试镀合格后，即可生产。

## （2）镀镍用阳极

镍阳极材料的纯度是电镀中最重要的条件，镍的含量>99%，不纯的阳极导致镀液污染，使镀层的物理性能变坏。在镀镍中比较适宜的镍阳极有含碳镍阳极、含氧镍阳极和含硫镍阳极。

### 2. 光亮镍

镀光亮镍有很多优点，不仅可以省去繁重的抛光工序，改善操作条件，节约电镀和抛光材料，还能提高镀层的硬度，便于实现自动化生产。但是光亮镍层中含硫，内应力和脆性较大，耐蚀性不如镀暗镍层。为了克服这些缺点，可采用多层镀镍工艺，使镀层的机械性能和耐蚀性得到显著改善。

### 3. 高硫镍

高硫镍，一般含硫量为 0.12%~0.25%。这种镍具有比铜、暗镍、光亮镍、半光亮镍、铬等都高的电化学活性。高硫镍镀层主要用于钢、锌合金基体的防护-装饰性组合镀层的中间层，其原理是上层镍比下层半亮镍含硫量高，因而使两层间的电位差达到 100~150mV，这样使双层镍由单层镍的纵向腐蚀转变为横向腐蚀，构成对钢铁基体的电化学保护作用。

### 4. 镍封

镍封，是在一般光亮镍液中加入不溶性固体微粒，在适当的共沉积促进剂帮助下，使这些微粒与镍共沉积而形成复合镀镍层。当在这种复合镀镍表层上沉积铬层时，由于复合镀镍层表面上的固体微粒不导电，铬不能沉积在微粒表面上，因而在整个镀铬层上的形成大量微孔，即形成微孔铬层。表面的大量微孔可在很大程度上消除普通铬层中的巨大内应力，因而减少了镀层的应力腐蚀，尤为重要是铬层上的大量微孔，将铬层下面的镍层大面积地暴露出来，在腐蚀介质的作用下，铬与镍组成腐蚀电池，铬层为阴极，微孔处暴露的镍层为阳极而遭腐蚀，从而改变了大阴极小阳极的腐蚀模式，使得腐蚀电流几乎被分散到整个镀镍层上，从而防止了产生大而深的直贯基体金属的少量腐蚀沟纹和凹坑，并使镀层的腐蚀速度减小，且向横向发展，因而保护了基体金属，显著提高了镀层的耐腐蚀性能。

### 5. 缎面镍

缎面镍，又叫缎状镍。缎面镍与镍封工艺没有本质的区别。它具绸缎状的外观，镀络后不会像光亮镍镀层镀铬那样有闪光，因而人眼注视后不会觉得疲劳，可以作为避免光线反射的防眩镀层。这类镀层在汽车反光镜、车辆内部注视零件、医疗器械、机床零件、眼镜镜框等表面已得到广泛应用。

### 6. 高应力镍

高应力镍，是在光亮镍的表面上再镀一层厚 1 $\mu$ m 左右的镍层。由于高应力镍的内应力大，所以在它的表面按常规再镀 0.2~0.3 $\mu$ m 的普通铬层。在铬层与高应力镍应力的相互作用处，高应力镍层即产生大量微裂纹，并导致铬层表面也形成均匀的微裂纹。这些裂纹部位组成无数个微电池，使腐蚀电流分散在微裂纹处，从而使整个镀层的耐蚀性能得到明显提高。

### 7. 镀多层镍

镀多层镍，是在同一基体上，选用不同的镀液成分及工艺条件，获得二层或三层的镀镍层，目的是在不增加镍层厚度或减少镍层的基础上，增加镍层的耐蚀能力。

### 8. 氨基磺酸盐镀镍

氨基磺酸盐镀镍，其主要优点是所得到的电镀层应力低，镀液沉积速度快，但价格较贵，用于电铸和印制电路板镀金前镀镍。

### 9. 柠檬酸盐镀镍

柠檬酸盐镀镍工艺主要用于锌压铸件的电镀。主要的维护措施是控制硫酸镍与柠檬酸盐之比



在 1 : (1.1~1.2), 温度不可过高, 以防止柠檬酸盐分解, 严格控制 pH 值。

### 15.1.3.3 镀铬工艺

由于镀铬层的优良性能, 广泛用做防护-装饰镀层体系的外表层和机能镀层。利用铬镀层的高硬度、耐磨性和抗腐蚀性, 以提高机械零件的耐磨性和修复被磨损机件的尺寸等, 可直接镀铬在钢铁零件之上。对于钢铁材料, 镀铬层为阴极性镀层, 而且薄的镀铬层是多孔的。因此, 使用中间镀层, 如镀铜层, 可构成铜铬镀层体系。

#### 1. 镀铬的特点

- (1) 镀铬用含氧酸作主盐, 铬和氧亲和力强, 电析困难, 导流效率低。
- (2) 铬为变价金属, 又有含氧酸根, 故阴极还原过程很复杂。
- (3) 镀铬虽然极化值很大, 但极化度很小, 故镀液的分散能力和覆盖能力差, 往往要采用辅助阳极和保护阴极。
- (4) 镀铬需用大电流密度, 而电流效率很低, 大量析出氢气, 导致镀液奥姆电压降大, 故镀铬的电压要比较高。

(5) 镀铬不能用铬阳极, 通常采用纯铅、铅锡合金、铅铋合金等不溶性阳极。

① 镀铬中若采用铬作阳极, 阳极电流效率接近 100%, 阴极电流效率仅 8%~13%, 铬的浓度会不断升高。

② 镀铬是六价铬直接还原的, 而铬阳极溶解的铬成不同价态, 而且以三价铬为主, 会导致三价铬迅速增加, 六价铬不断下降, 造成故障。

③ 金属铬很脆, 难以成型和机加工。

#### 2. 镀铬的影响因素

- (1) 温度高, 导电性好。
- (2) 硫酸浓度低时, 低电流密度下电流效率高。
- (3) 三价铬很少时, 沉积速率减慢; 三价铬很高时, 镀层变暗; 三价铬增加, 则导电度降低, 需较大电压; 三价铬愈多, 光泽范围愈小。
- (4) 镀液温度升高, 电流效率降低; 电流密度愈高, 电流效率愈高; 高电流密度、低温则镀层灰暗, 硬度高脆性大, 结晶粗大。
- (5) 高温而低电流密度, 镀层硬度小, 呈乳白色, 延性好, 无网状裂纹, 结晶细致, 适合装饰性的镀件。

(6) 中等温度及中等电流密度, 镀层硬度高, 呈密集的网状裂纹和光亮硬质铬镀层。

(7) 杂质的影响: 铁杂质使电解液不稳定, 光泽镀层范围缩小, 导电性变差, 电压须增高, 去除铁杂质比三价铬还困难, 要尽量防止铁污染, 不要超过 10g/L; 铜、锌杂质含量低时, 对镀层影响不大, 铜最好不要大于 3g/L; 硝酸是镀铬最有害的杂质, 镀液须严禁带入硝酸污染。

(8) 阳极的铅易氧化, 形成黑色的氧化铅及黄色的铬酸铅, 黄色的铬酸铅导电性不良。

#### 3. 镀铬溶液

镀铬溶液的基本组分是铬酐和硫酸。按铬酐浓度可分为低、中、高浓度三种。

##### (1) 低浓度镀液

低浓度镀液, 通常系指铬酐含量为 120g/L 以下的镀液, 具有减少污染、降低成本、电流效率比较高(18%~20%)、镀层光亮度好、光亮电流密度范围宽等优点。缺点是需要较高的槽电压, 镀液覆盖能力较差, 适合于零件形状较简单的场合。

### (2) 中浓度镀液

中浓度镀液,通常系指铬酐含量为 180~250g/L 的镀液。铬酐 250g/L,硫酸根 2.5g/L 的镀液称为标准镀铬液,多用于镀硬铬。在这类镀液中加入镀铬添加剂,特别是混合稀土金属盐添加剂,镀液性能则有很大改善:

- ① 可将铬酐浓度降低到 150~180g/L 以内,镀液的覆盖能力明显提高,超过高浓度液。
- ② 可降低析铬的临界电流密度值,即使采用较低电流密度(如 8~10A/dm<sup>2</sup>),电流效率也能达到 20%以上,槽电压低于 10V,故有明显的节电效果。
- ③ 可实现常温电镀,在 15~50℃之间均可施镀,有利于节约能源,提高工效,综合经济和环境效益好。这是现代电镀铬工艺的发展方向。

### (3) 高浓度镀液

高浓度镀液,是指铬酐浓度为 300~400g/L 的镀液。具有较高的分散能力和覆盖能力,主要用于装饰性镀铬。这种镀液带出损失多、对环境污染较严重。电流效率低(8%~13%)。随着稀土等镀铬添加剂的开发和应用,这类镀液已逐渐缩减。

### 4. 镀铬常见缺陷及其原因

(1) 镀层粗糙有颗粒 电流太大、阴极保护不当、阴阳极太近、表面前处理不好、镀液有浮悬杂质、硫酸太少。

(2) 镀层脱落 前处理不良、中途断电、中途加冷水、预热不够。

(3) 局部无镀层 电流太小、镀件互相遮盖、装挂不当,气体停滞。

(4) 镀层不均匀 挂具接触不良、气体不易逸出。

(5) 沉积速度慢 电流太小、三价铬太小、二极间距太大、镀件过大、槽内镀件过多。

(6) 镀层暗色 温度太低、三价铬太多。

(7) 镀层针孔 前处理不佳、气体停滞在镀件表面上,镀件被磁化、浮悬杂质、表面活性剂、镀液有磁性粒子。

### 5. 去除氢脆

镀铬的电流效率非常低,所以产生大量的氢气,会引起氢脆,尤其是硬化钢、高强度钢更需注意。

(1) 镀前先做应力消除 镀铬表面必须没有应力存在,一般镀件经机械加工、研磨或硬化热处理都有残留应力,可加热 150~230℃消除残留应力。

(2) 镀后烘箱去氢 根据工件大小和镀层厚度确定温度和时间,通常选择的温度为 150~250℃,时间 0.5~5h。

## 15.1.3.4 合金电镀

### 1. 高耐蚀锌合金电镀工艺

锌合金,是指以锌为主要成分并含有少量其他金属的合金。用于生产的二元锌合金有: Zn-Ni, Zn-Co, Zn-Fe, Sn-Zn, Zn-Ti, Zn-Cr, Zn-P, Zn-Mn 等。锌合金具有良好的防护性能,故常称之为高耐蚀合金镀层。其中,应用比较广泛的主要是锌和铁族金属形成的合金,即锌-镍、锌-钴和锌-铁。铁族金属的原子结构和性质相近,它们与锌形成合金的共沉积特性也很相似。从电极电位来看,铁族金属的电位比锌正,但在共沉积时,锌比铁族金属容易沉积而优先沉积,这种沉积称为异常共沉积。其原因是当锌与铁族金属在阴极表面共沉积时,随着阴极表面 H<sub>2</sub> 的析出,使表面 pH 值升高,在阴极表面生成了氢氧化锌胶体薄膜,致使铁族金属离子在阴极表面受到抑制而难以沉积,于是锌在阴极表面优先析出。

#### (1) 电镀锌-铁合金工艺及钝化处理

已获得工业应用的锌-铁合金有两种：一种是含铁量高的（10%~25%或更高）合金，该镀层不易钝化，易磷化处理，对油漆有良好的结合力，多用于钢板和钢带的表面处理，作为电泳漆的底层；另一种是含微量铁的锌-铁合金，镀层易钝化，耐蚀性能优良，特别经过黑色钝化，其耐蚀性有很大提高。锌-铁合金工艺也可分为酸性和碱性两种类型，合金镀层含铁量一般在 0.2%~0.7%之间，镀液中三价铁离子不能含量过高，否则会降低阴极电流效率，结晶粗大。

锌-铁合金在铬酸中黑色钝化时，镀层中微量铁的存在和微量银盐具有相同的作用，能使钝化膜呈黑色。碱性无氰锌铁合金电镀工艺可根据需要得到半光亮至全光亮的锌合金镀层。镀液的分散能力和覆盖能力良好，镀层光亮均匀，适合于挂镀及滚镀操作。镀层含铁量约为 0.2%~0.7%，防腐能力与硬度均优于传统镀锌。

此合金镀层经 BH-黑色钝化工艺钝化以后，可直接得到油亮黑色镀层，耐蚀性及硬度极为优秀。

## （2）电镀锌-镍合金工艺及钝化处理

碱性锌镍合金的工艺特点：镍含量稳定，镀层中镍含量一般为 8%~10%。合金镀层光亮，可直接钝化。耐蚀性优异，8 $\mu\text{m}$  的锌镍合金镀层，经彩色钝化后能耐 NSS 试验 1000h，不生白锈，2000h 未见红锈。

碱性锌镍合金及钝化工艺多年来一直在汽车工业、电子设备（磁性材料）、电力输变电支撑架等产品上获得应用。

## 2. 代铬工艺

采用锡钴锌合金电镀作代铬镀层，镀层色泽和耐蚀性可与铬媲美，能源消耗比镀铬低，镀液的深镀能力远胜于镀铬，用于小零件的常规滚镀生产，经济效益显著。代铬电镀工艺的工艺流程通常为：已镀好底层的镀件（包括酸性光亮铜、光亮镍、镍铁、铜锡合金或锌铜合金等）→水洗→弱酸活化→水洗→代铬电镀→水洗→钝化→水洗→干燥→检验→成品。

代铬电镀溶液含有多种金属盐、络合剂、缓冲剂和光亮剂。代铬添加剂系列中每个品种的 pH 值都不相同，例如，代铬补给 1 号 pH 值 12~13，代铬补给 2 号 pH 值 2~3，代铬开缸剂 pH 值 7~8，代铬稳定剂 pH 值 8~9，因此，把多种金属盐、多种络合剂等不同的 pH 值溶液混合在一起，极易引起镀液混浊沉淀，配制时必须注意加料顺序。

在生产过程中镀液轻微混浊是正常现象，对镀液光亮度影响不大。但是，当出现严重混浊，镀液变成乳白色状，则镀层易变成灰白色或暗色，即使再添加其他补剂，也难以镀出兰白光亮的代铬镀层；必须及时处理。产生混浊的原因，主要是锡盐水解或生成氢氧化钴沉淀。当稳定剂含量不足或金属离子浓度过高，或者 pH 值不当和温度过高都会加快镀液混浊。

另外，加入 2 号补剂过多，钴盐浓度升高，络合剂浓度不足，亦会出现氢氧化钴沉淀；同时触发锡盐水解，导致出现粉红色氢氧化钴和白色的偏锡酸沉淀物。

镀液的温度对镀层外观影响较大，在 38~45℃镀层呈光亮铬白色；温度低，色泽偏暗，类似不锈钢色；温度高，镀层有雾状或亚白色，同时也加速锡盐水解，产生混浊，故温度不宜超过 55℃。代铬电镀滚桶转速宜在 3~4r/min。较慢的转速有利于增加镀液的分散能力和深镀能力，镀出白亮镀层；若转速过快，代铬层质量变差，有漏镀和镀层发黄等毛病。

代铬电镀要用正式的 1 铬 18 镍 9 钛不锈钢板作阳极，如果用不锈钢或铁板，阳极会发生溶解，镀层容易发黄。

## 3. 玫瑰金电镀工艺

玫瑰金工艺可以获得流行的玫瑰金色，色泽鲜艳、均匀，具有极好的装饰效果。成熟的玫瑰金电镀工艺应具有工艺稳定、操作简单、溶液的深镀能力和均镀能力优异、成本较低等特点。玫

瑰金中各主要成分和辅助成分均有严格比例, 生产时不要加入任何金属盐或悬挂可溶性阳极, 只要按消耗量添加补给剂, 在工艺范围内便可获得稳定的色调。进入玫瑰金槽的工件和挂具必须清洗干净。带入其他镀液会严重影响玫瑰金效果, 严重时会造成玫瑰金液报废。

#### 4. 仿金电镀工艺

在装饰电镀工艺中, 仿金电镀是应用面最广的电镀工艺。获得金色外观的方法很多, 有镀真金、镀铜锌、铜锡仿金、着金色电泳漆、代金胶工艺等。其中, 仿金电镀是普遍使用的工艺, 铜锌、铜锡或铜锌锡合金电镀溶液中最常用、也最稳定的是氰化镀液。

由于仿金镀层在空气中极易变色, 因此, 镀后处理极为重要。首先要进行钝化处理, 虽然使用含六价铬的化学钝化效果不错, 但碱性重铬酸钾的电解钝化对防止仿金镀层变色效果更好, 因而获得广泛应用。

要注意保持阳极表面清洁, 若阳极表面产生黑色膜, 应提出槽外经水洗→酸洗→水洗干净后, 再放回镀槽内。为保证钝化质量, 槽液 pH 值应不低于 12.5, 钝化后的工件必须经过充分的水洗, 再作切水和切油处理。其工艺流程如下: 仿金→水洗→水洗→电解钝化→超声波水清洗→水洗一次→切水→切油。切水, 是用切水, 剂脱去工件表面的水份, 因而使工件表面变得不亲水。切油是去掉工件表面的不亲水的切水剂, 然后烘干喷漆。

#### 5. 黑色镀层电镀工艺

黑色镀层电镀工艺用于光学仪器、军工产品、轻工产品的外观装饰和消光、吸热等功能性用途。这种镀层较薄, 本身无法对基体起到良好的防腐作用, 应镀有铜、镍等中间镀层, 以改善其外观及耐蚀性。镀后往往还要涂油或上一层有机涂料来加以保护。

##### (1) 镍-锌合金(黑镍)

以镍-锌合金为主的黑镍中含镍约 40%~60%, 锌 20%~30%, 硫 0%~15%, 有机物 10%左右。在电镀过程中, 硫氰酸根离子中硫与镍生成黑色的 NiS。由于电流密度很低, 所获镀层较脆, 故不可能镀得太厚, 其镀层光亮度全靠底镀层的光亮效果, 底镀层越亮, 黑镍层越显黑, 否则黑度下降。

##### (2) 镍-锡合金(珍珠黑镀层)

Ni-Sn 镀层由于其黑色外观而常被称为枪色镀层或珍珠黑镀层。镀层中一般含 Ni35%、Sn65%, 有时适当加入 Cu 以增加镀层的硬度和改善外观。黑色 Ni-Sn 镀层, 主要是 Ni 和 Sn 在一定比例下加入发黑剂, 含 S、N 化合物, 如含硫氨基酸等。与黑色 Ni-Zn 镀层一样, Ni-Sn 的黑色程度也往往取决于底镀层的光亮效果, 但一般来讲, Ni-Sn 镀层的黑度略差于 Ni-Zn 镀层。但这种色调十分庄重、典雅, 深受人们的喜爱。

珍珠黑电镀工艺分有氰和无氰两类。氰化物镀液较稳定, 黑色较均匀; 无氰镀液的络合剂如果选择适当, 也可获得较好的效果。Ni-Zn 与 Ni-Sn 黑色镀层均易变色, 尤其是 Ni-Zn 镀层更易变色, 电镀表面失光、黑度不匀, 严重影响外观。由于这类镀层在镀后脱水之前, 接触电镀车间的有害气体, 极易变色, 所以镀后一定要进行钝化处理。为了提高其实用效果和使用寿命, 经钝化后的黑色镀层一般都要涂覆一层保护涂料。

#### 15.1.3.5 片式元器件电镀

在片式元器件的生产工艺中, 表面处理占有十分重要的地位。用于贴装焊接在印制电路板上的元器件的端电极需要用三层镀技术来制作, 其中最外层铅-锡合金电镀工艺是采用低污染, 低酸度的甲基磺酸体系。片式组件在贴片安装后通过波峰焊将电子组件端电极与线路结合成一体。因此, 三层镀的好坏直接影响组件的性能。三层镀的第一层由银浆烧成制作, 其作用是将组件迭层

中的电极引出,制成端电极。第二层是在银层上电镀镍,其作用是封闭银层,保护银层使其在以后的焊接等工序中不受影响。第三层是电镀锡(铅),其作用主要是保证组件的优良焊接性能。因此,在三层镀中实际上电镀只有二层。

在烧结的银电极上电镀镍,目的是保护银层。要求具有低应力(当然最佳是零应力)的镍镀层。否则,电镀镍后,会由于镍镀层的应力作用而将银层从瓷体上剥开,而破坏端电极。氨基磺酸镀镍体系是所有镀镍体系中获得低应力镀层的最理想的体系,而且还具有电镀速度快,镀液分散能力好的优点。国外用于片式组件三层镀的体系中,较多采用了氨基磺酸盐体系。为了确保镀镍层内应力小,除了对电镀工艺加以控制之外,还要控制电镀参数,如 4.0~4.5 的 pH 值;控制阴极电流密度等。此外,还可加入降低应力的添加剂。

### 15.1.3.6 塑料电镀工艺

(1) 除油 由于塑料制品表面常沾有指纹、油污等有机物,以及靠静电作用而附着的灰尘等无机物,这些污垢都应加以去除。除油常用的碱性试剂有硅酸盐和磷酸盐两类,其中,硅酸盐会在表面形成硅酸盐薄膜,对后续浸蚀处理有影响,所以通常使用磷酸盐除油剂。

(2) 预浸蚀 由于工程塑料及超工程塑料耐化学药品性能好,一般难以被化学药品浸蚀,因而在浸蚀之前要进行预浸蚀。预浸蚀常使用有机溶剂,利用有机溶剂使塑料表面产生膨润来提高浸蚀加工效果。有的塑料较易被化学药品浸蚀,则可省略预浸蚀步骤。

(3) 浸蚀 此工序是采用强氧化剂或强酸、强碱对塑料进行化学处理,使塑料表面有选择性溶解,产生凹凸不平的固定点,结果使电镀产生良好的外观并保证镀层附着性好。如 ABS 塑料(苯乙烯-丁二烯-丙烯腈共聚物)采用铬酸和硫酸的混合液做浸蚀剂,在强氧化性的铬酸作用下,塑料中的丁二烯氧化形成羰基等极性基并在塑料表面产生固定点。又如工程塑料和超工程塑料经预浸蚀处理后,再在铬酸作用下,膨润的表面层就会局部产生氧化的固定点。而有无无机物或玻璃纤维做填充剂的工程塑料,在强氧化剂的浸蚀作用下,填充剂溶解脱落而在塑料表面形成固定点。含有酯类结构的塑料在强酸、强碱浸蚀下也会解离而形成活化的固定点。

(4) 中和 经浸蚀处理后必须去除塑料表面残留的浸蚀剂。若用盐酸做浸蚀剂,需用氢氧化钠等碱中和。如果用铬酸做浸蚀剂,表面上有残留的铬酸,会使后续的非电解电镀产生的镀层无法在塑料表面形成,此时通常使用有还原性的盐酸或有机酸去除。

(5) 表面清理 对工程塑料和超工程塑料则需要这一步骤,目的是为了在后续的添加催化剂处理步骤中提高表面对催化剂(金属钯)的吸附性。

(6) 添加催化剂及活化处理 为了使非电解电镀获得良好的效果,在塑料表面要吸附催化剂金属钯。具体作法是把塑料浸渍在含有氯化钯或二氯化锡的溶液中浸渍,再在碱液或酸液中进行活化处理(多采用在硫酸或盐酸溶液中活化处理)以促进金属钯的生成。其反应式为:



(7) 非电解电镀 又称化学电镀,是指不依靠外界电流作用,仅依靠化学试剂的氧化还原反应在物体表面沉积一层金属的方法。如化学镀银,即是利用甲醛与银氨络合物发生氧化还原反应在金属、塑料等表面沉积一层银的方法。化学镀镍,即是把被镀件浸入硫酸镍、次磷酸二氢钠( $\text{NaH}_2\text{PO}_2$ )和柠檬酸(螯合剂)组成的混合溶液中,在一定 pH 值和温度下,溶液中镍离子被次磷酸二氢钠还原为金属并沉积在受镀件表面上。在这个反应中钯起催化剂的作用。化学镀铜,即把被镀件浸入硫酸铜、酒石酸钾钠(螯合剂)和甲醛组成的混合溶液中,在碱性条件下,溶液中的铜离子被甲醛还原成金属铜而沉积在受镀件表面上。

为了使电镀层获得满意的效果,在完成第一次化学镀层之后需继续多次进行化学镀层,以提高镀层厚度;或利用化学镀层的导电性,用常规电镀方法继续进行电镀处理。

## 15.2 塑料加工工艺技术

### 15.2.1 塑料成型工艺

#### 15.2.1.1 塑料成型性能

塑料都以合成树脂为基本原料,并适量加入填料、增塑剂、染料、稳定剂等各种辅助料混合而成。因此,不同品种牌号的塑料,由于选用树脂及辅助料的性能、成分、配比及塑料生产工艺不同,其使用及工艺特性也各不相同。

##### 1. 热固性塑料

热固性塑料质地坚硬,不溶于溶剂,加热也不再软化;如果温度过高则分解。常用热固性塑料有酚醛(电木粉)、氨基(三聚氰胺、脲醛)聚酯、聚邻苯二甲酸二丙烯酯等,主要用于隔热、耐磨、绝缘、耐高压电等恶劣环境,其成型工艺有压塑、挤塑、注射成型等。硅酮、环氧树脂等塑料,目前主要作为低压挤塑封装电子组件及浇注成型等用。

##### (1) 收缩率

塑件从模具中取出冷却到室温时发生尺寸收缩的性能称为收缩性。由于收缩不仅是树脂本身的热胀冷缩,而且还与各成型因素有关,所以成型后塑件的收缩应称为成型收缩。

① 成型收缩的形式。成型收缩主要表现在下述几方面:

a. 塑件的线尺寸收缩。由于热胀冷缩,塑件脱模时的弹性恢复、塑性变形等原因导致塑件脱模冷却到室温后其尺寸缩小,因此型腔设计时必须考虑予以补偿。

b. 收缩方向性成型时分子按方向排列,使塑件呈现各向异性:沿料流方向(即平行方向)收缩大、强度高;与料流直角方向(即垂直方向)收缩小、强度低。另外,成型时由于塑件各部位密度及填料分布不均,故使收缩也不匀。产生收缩差使塑件易发生翘曲、变形、裂纹,尤其在挤塑及注射成型时方向性更为明显。因此,模具设计时应考虑收缩方向性按塑件形状、流料方向选取收缩率。

c. 后收缩塑件成型时,由于受成型压力、剪切应力、各向异性、密度不均、填料分布不均、模温不均、硬化不均、塑性变形等因素的影响,引起一系列应力的作用,在黏流态时不能全部消失,故塑件在应力状态下成型时存在残余应力。当脱模后由于应力趋向平衡及储存条件的影响,使残余应力发生变化而使塑件发生再收缩,称为后收缩。一般塑件在脱模后 10h 内变化最大,24h 后基本定型,但最后稳定要经 30~60 天。通常热塑性塑料的后收缩比热固性大,挤塑及注射成型的比压塑成型的大。

d. 后处理收缩。有时塑件按性能及工艺要求,成型后需进行热处理,处理后也会导致塑件尺寸发生变化。故模具设计时对高精度塑件应考虑后收缩及后处理收缩的误差并予以补偿。

② 收缩率计算。塑件成型收缩可用收缩率来表示,如式(15-12)及式(15-13)所示。

$$Q_{\text{实}} = (a-b) / b \times 100 \quad (15-12)$$

$$Q_{\text{计}} = (c-b) / b \times 100 \quad (15-13)$$

式中  $Q_{\text{实}}$  为实际收缩率(%);  $Q_{\text{计}}$  为计算收缩率(%);  $a$  为塑件在成型温度时单向尺寸(mm);  $b$  为塑件在室温下单向尺寸(mm);  $c$  为模具在室温下单向尺寸(mm)。

实际收缩率为塑件实际所发生的收缩,因其值与计算收缩相差很小,所以模具设计时以  $Q_{\text{计}}$  为

设计参数来计算型腔及型芯尺寸。

③ 影响收缩率变化的因素。在实际成型时不同品种塑料不仅其收缩率各不相同，而且不同批次的同品种塑料或同一塑件的不同部位其收缩率也经常不同。影响收缩率变化的主要因素有如下几个方面。

a. 塑料品种。各种塑料都有其各自的收缩范围，同种类塑料由于填料、分子量及配比等不同，其收缩率及各向异性也不同。

b. 塑件特性。塑件的形状、尺寸、壁厚、有无嵌件、嵌件数量及布局对收缩率的大小也有很大影响。

c. 模具结构。模具的分型面及加压方向、浇注系统的形式、布局及尺寸对收缩率及方向性影响也较大，尤其在挤塑及注射成型时更为明显。

④ 成型工艺。挤塑、注射成型工艺一般收缩率较大，方向性明显。预热情况、成型温度、成型压力、保持时间、填装料形式及硬化均匀性对收缩率及方向性都有影响。

如上所述，模具设计时应根据各种塑料的说明书中所提供的收缩率范围，并按塑件形状、尺寸、壁厚、有无嵌件情况、分型面及加压成型方向、模具结构及进料口形式、尺寸和位置、成型工艺等诸因素综合考虑来选取收缩率值。挤塑或注射成型时，常按塑件各部位的形状、尺寸、壁厚等特点选取不同的收缩率。另外，成型收缩还受到各成型因素的影响，但主要决定于塑料品种、塑件形状及尺寸。所以成型时调整各项成型条件也能够适当地改变塑件的收缩情况。

## (2) 流动性

塑料在一定温度与压力下填充型腔的能力称为流动性。这是模具设计时必须考虑的一个重要工艺参数。流动性大易造成溢料过多、填充型腔不密实、塑件组织疏松、树脂填料分头聚积、易粘模、脱模及清理困难、硬化过早等弊病。但流动性小则填充不足，不易成型，成型压力大。所以选用塑料的流动性必须与塑件要求、成型工艺及成型条件相适应。模具设计时应根据流动性能来考虑浇注系统、分型面及进料方向等。

热固性塑料流动性通常以拉西格流动性（以毫米计）来表示。数值大则流动性好，每一品种的塑料通常分三个不同等级的流动性，以供不同塑件及成型工艺选用。一般塑件面积大、嵌件多、型芯及嵌件细弱，有狭窄深槽及薄壁的复杂形状对填充不利时，应采用流动性较好的塑料。挤塑成型时应选用拉西格流动性 150mm 以上的塑料，注射成型时应用拉西格流动性 200mm 以上的塑料。为了保证每批塑料都有相同的流动性，在实际中常用并批方法来调节，即将同一品种而流动性有差异的塑料加以配用，使各批塑料流动性互相补偿，以保证塑件质量。

在填充型腔时常受各种因素的影响而使塑料实际填充型腔的能力发生变化。粒度细匀（尤其是圆状粒料）、湿度大、含水分及挥发物多、预热及成型条件适当、模具表面光洁度好、模具结构适当等则都有利于改善流动性。反之，预热或成型条件不良、模具结构不良、流动阻力大或塑料储存期过长、超期、储存温度高（尤其对氨基塑料）等，则都会导致塑料填充型腔时，其实际流动性下降而造成填充不良。

## (3) 比容及压缩率

比容为每 1g 塑料所占有的体积（以  $\text{cm}^3/\text{g}$  计）。压缩率为塑粉与塑件两者体积或比容之比值（其值恒大于 1）。它们都可被用来确定压模装料室的大小。其数值大即要求装料室体积要大，同时又说明塑粉内充气多，排气困难，成型周期长，生产率低；比容小则相反，而且有利于压锭、压制。

## (4) 硬化特性

热固性塑料在成型过程中往加热受压转变成可塑性黏流状态,随之流动性增大填充型腔;与此同时发生缩合反应,交联密度不断增加,流动性迅速下降,融料逐渐固化。模具设计时对硬化速度快、保持流动状态短的料,应注意使其便于装料和装卸嵌件,并选择合理的成型条件和操作,以免硬化过早或不足而导致塑件成型不良。

硬化速度一般与塑料品种、壁厚、塑件形状、模温等有关,还与预热状态有关。适当的预热应保持能使塑料在发挥出流动性最大的前提下而提高其硬化速度。一般预热温度高、时间长(在允许范围内)则硬化速度加快,尤其预压锭坯料经高频预热后硬化速度显著加快。另外,成型温度高、加压时间长则硬化速度也随之增加。因此,硬化速度也可通过调节预热或成型条件予以适当控制。硬化速度还应适合成型方法的要求,例如,注射、挤塑成型时要求在塑化、填充时化学反应慢、硬化慢,应保持较长时间的流动状态;但当充满型腔后在高温、高压下应快速硬化。

#### (5) 水分及挥发物含量

各种塑料都含有不同程度的水分和挥发物,当其含量过多时流动性增大、易溢料、保持时间长、收缩增大,易发生波纹、翘曲等弊病,影响塑件的机电性能。但当塑料过于干燥时也会导致流动性不良成型困难。不同塑料应按要求进行预热干燥;对吸湿性强的料,尤其在潮湿季节,对预热后的料也应防止再吸湿。

由于各种塑料中含有不同成分的水分及挥发物,同时在缩合反应时要发生缩合水分,这些成分都需在成型时变成气体排出模外;有的气体对模具有腐蚀作用,对人体也有刺激作用。为此在模具设计时应应对各种塑料的此类特性有所了解,并采取相应措施,如预热、模具镀铬,开排气槽或成型时设排气工序等。

#### (6) 成型特性

各种塑料,其成型特性除了与塑料品种有关外,还与所含填料品种和粒度及颗粒均匀度有关。细料流动性好,但预热不易均匀,充入空气多不易排出、传热不良、成型时间长;粗料塑件不光泽,易发生表面不均匀。过粗、过细还直接影响比容及压缩率、模具加料室容积。颗粒不均匀,则成型性不好、硬化不匀。

### 2. 热塑性塑料

热塑性塑料品种极多,即使同一品种也由于树脂分子及附加物配比不同而使其工艺特性不同。另外,为了改变原有品种的特性,常用共聚、交链等各种化学聚合方法在原有的树脂结构中导入一定百分比量的异种单体或高分子相等树脂,以改变原有树脂的结构成为具有新的使用特性及工艺特性的改性品种。由于热塑性塑料品种多、性能复杂,即使同一类的塑料也有仅供注射用或挤出用之分,本节主要介绍各种注射用的热塑性塑料。

#### (1) 收缩率

热塑性塑料成型收缩的形式及计算如前所述,影响热塑性塑料成型收缩的因素如下:

① 塑料品种。热塑性塑料成型过程中残余应力大,分子取向性强,与热固性塑料相比收缩率较大,方向性明显,成型后的收缩、退火或调湿处理后的收缩一般也都比热固性塑料大。

② 塑件特性。成型时融料与型腔表面接触,外层立即冷却形成低密度的固态外壳。由于塑料的导热性差,使塑件内层缓慢冷却而形成收缩大的高密度固态层。所以壁厚、冷却慢、高密度层厚的,则收缩大。另外,有无嵌件及嵌件布局、数量都直接影响料流方向、密度分布及收缩阻力大小等,所以塑件的特性对收缩大小和方向性影响都较大。

③ 进料口形式、尺寸、分布。这些因素直接影响料流方向、密度分布、保压补缩作用及成型时间。直接进料口、进料口截面大(尤其截面较厚的)则收缩小,但方向性大;进料口宽及长



度短的则方向性小。距进料口近的或与料流方向的平行则收缩大。

④ 成型条件。模具温度高、融料冷却慢的，密度高、收缩大。模温分布与塑件内外冷却及密度均匀性也有关系，直接影响到各部分收缩量的大小及方向性。另外，保持压力及保持时间对收缩影响也较大，压力大、时间长的则收缩小但方向性大。注射压力高，融料黏度差小，层间剪切应力小，脱模后弹性回跳大，故收缩也适量减小。料温高则收缩大，但方向性小。因此，在成型时调整模温、压力、注射速度及冷却时间等诸因素，均可适当改变塑件收缩情况。

模具设计时，要根据各种塑料的收缩范围、塑件壁厚、形状，进料口形式尺寸及分布情况，按经验确定塑件各部位的收缩率，再来计算型腔尺寸。对高精度塑件、难以掌握收缩率的塑件，一般宜用如下方法设计模具：

- a. 对塑件外径取较小收缩率，内径取较大收缩率，以留有试模后修正的余地。
- b. 通过试模来确定浇注系统形式、尺寸及成型条件。
- c. 需要后处理的塑件经后处理确定尺寸变化情况（测量时必须在脱模 24h 以后）。
- d. 按实际收缩情况修正模具。

### （2）流动性

热塑性塑料，其流动性大小，一般可从分子量大小、熔融指数、阿基米得螺旋线长度、表现黏度及流动比（流程长度/塑件壁厚）等一系列指数进行分析。分子量小、分子量分布宽、分子结构规整性差、熔融指数高、螺旋线长度长、表现黏度小及流动比大的则流动性就好。对同一品名的塑料必须检查其说明书，判断其流动性是否适用于注射成型。

各种塑料的流动性也因成型因素不同而变。主要的影响因素有如下几种：

① 温度。因为料温高则流动性增大，但不同塑料也各有差异。聚苯乙烯（尤其耐冲击型及 MI 值较高的）、聚丙烯尼龙、有机玻璃、改性聚苯乙烯、聚碳酸酯、醋酸纤维等塑料的流动性随温度变化较大。对聚乙烯、聚甲醛，温度增减对其流动性则影响较小。所以，前者在成型时宜调节温度来控制其流动性。

② 压力。因为注射压力增大则融料受剪切作用大，流动性也增大，特别是聚乙烯、聚甲醛较为敏感，所以，成型时宜调节注射压力来控制其流动性。

③ 模具结构。浇注系统的形式、尺寸、布置、冷却系统设计、融料流动阻力（如型面光洁度、料道截面厚度、型腔形状、排气系统）等因素都直接影响到融料在型腔内的实际流动性，凡促使融料降低温度、增加流动性阻力的则流动性就降低。模具设计时应根据所用塑料的流动性，选用合理的结构。成型时也可控制料温、模温及注射压力、注射速度等因素来适当地调节填充状态以满足成型需要。

### （3）结晶性

热塑性塑料按其冷凝时是否有结晶现象可划分为结晶形塑料与非结晶形（又称无定形）塑料两大类。所谓结晶现象即为塑料由熔融状态冷凝时，分子由独立移动、完全处于无次序状态，变成分子停止自由运动，按略微固定的位置，并呈现出使分子排列成为正规模型倾向一种现象。作为判别这两类塑料的外观标准可视塑料的壁厚、塑件的透明性而定，一般结晶性料为不透明或半透明（如聚甲醛等），而无定形料为透明（如有机玻璃等）。但也有例外情况，如 ABS 为无定形料但却并不透明。

在模具设计及选择注射机时，对结晶料有下列要求：

- ① 料温上升到成型温度所需热量多的，要用塑化能力大的设备。
- ② 冷凝时放出热量大的，要充分冷却。
- ③ 冷却快的结晶度低，收缩小，透明度高。结晶度与塑件壁厚有关，壁厚冷却慢结晶度高，

收缩大，物性好。所以结晶性料应按要求控制模温。

#### (4) 热敏性及水敏性

热敏性塑料系指某些塑料对热较为敏感、在高温下受热时间较长或进料口截面过小、剪切作用大时，料温增高易发生变色、降聚或分解的倾向，具有这种特性的塑料称为热敏性塑料。如硬聚氯乙烯、聚偏氯乙烯、醋酸乙烯共聚物、聚甲醛等。热敏性塑料在分解时产生单体、气体、固体等副产物，特别是有些分解气体对人体、设备、模具都有刺激、腐蚀作用或毒性。因此，模具设计、选择注射机及成型时都应注意选用螺杆式注射机，浇注系统截面宜大，模具和料筒应镀铬，不得有死角滞料，必须严格控制成型温度，在塑料中加入稳定剂，以减弱其热敏性能。

有的塑料（如聚碳酸酯）即使含有少量水分，在高温、高压下也会发生分解，这种性能称为水敏性，对此必须预先加热干燥。

#### (5) 应力开裂及熔融破裂

有的塑料对应力敏感，成型时易产生内应力并质脆易裂，塑件在外力作用下或在溶剂作用下即发生开裂现象。为此，除了在原料内加入附加剂提高抗裂性外，对原料应注意干燥，合理选择成型条件，以减少内应力和增加抗裂性；并应选择合理的塑件形状，不宜设置嵌件等，尽量减少应力集中。模具设计时应增大脱模斜度，选用合理的进料口及顶出机构，成型时应适当调节料温、模温、注射压力及冷却时间，尽量避免塑件过于冷脆时脱模，成型后塑件还宜进行后处理提高抗裂性，消除内应力并禁止与溶剂接触。

当一定熔融指数的聚合物熔体，在恒温下通过喷嘴孔时其流速超过某值后，熔体表面发生明显横向裂纹称为熔融破裂，有损塑件外观及物性。故在选用熔融指数高的聚合物等，应增大喷嘴、浇道、进料口截面，降低注射速度，提高料温。

#### (6) 热性能及冷却速度

各种塑料有不同比热、热传导率、热变形温度等热性能。比热高的塑化时需要的热量大，应选用塑化能力大的注射机。热变形温度高的冷却时间可短一些，但脱模后要防止冷却变形。热传导率低的冷却速度慢（如离子聚合物等冷却速度极慢）必须充分冷却，要加强模具冷却效果。热浇道模具适用于比热低、热传导率高的塑料。比热大、热传导率低、热变形温度低、冷却速度慢的塑料则不利于高速成型，必须用适当的注射机并加强模具冷却。

各种塑料按其品种特性及塑件形状，要求必须保持适当的冷却速度。所以模具必须按成型要求设置加热和冷却系统，以保持一定模温。当料温使模温升高时应予冷却，以防止塑件脱模后变形，缩短成型周期，降低结晶度。当塑料余热不足以使模具保持一定温度时，则模具应设有加热系统，使模具保持在一定温度，以控制冷却速度，保证流动性，改善填充条件使其缓慢冷却。对流动性好、成型面积大、料温不均的塑料，则按塑件成型情况有时需加热或冷却交替使用或局部加热与冷却并用。为此模具应设有相应的冷却或加热系统。

#### (7) 吸湿性

塑料中因有各种添加剂，使其对水分各有不同的亲疏程度，所以塑料大致可分为吸湿且黏附水分和不吸水也不易黏附水分的两种。料中含水量必须控制在允许范围内，不然在高温、高压下水分变成气体或发生水解作用，将会产生树脂起泡、流动性下降、外观不美及机电性能下降等不良现象。所以吸湿性塑料必须按要求采用适当的加热方法规范进行预热，在使用时还需用红外线照射以防止再吸湿。

### 3. 热固性增强塑料

为了进一步改善热固及热塑性塑料的机电性能，常在塑料中加入玻璃纤维填料（简称玻纤）。作

为增强材料,以树脂为黏结剂而组成的新型复合材料,通称为增强塑料(热固性塑料的增强塑料又称为玻璃钢)。由于塑料配方的玻璃纤维的品种、长度、含量等不同,其工艺性及使用特性也各不相同。

热固性增强塑料是以树脂、增强材料、辅助剂等组成。其中,树脂作为黏结剂,要求它要是有良好的流动性、适宜的固化速度、副产物少、易调节黏度和良好的互溶性。增强材料起骨架作用,其品种规格繁多,主要是采用玻璃纤维,一般含量为 60%、长度为 15~20mm。辅助剂,包括调节黏度的稀释剂(用以改进玻纤与树脂的粘结);用以调节树脂与纤维界面状态的玻纤表面处理剂;用以改进流动性、降低收缩、提高光泽度及耐磨性等所使用的填料和着色颜料等。选用的树脂、玻纤的品种规格(长度、直径、无碱或含碱、支数、股数、加捻或无捻)、表面处理剂、玻纤与树脂混制工艺(预混法或预浸法、塑料配比等)不同,其性能也各不相同。

#### (1) 流动性

增强料的流动性比一般压塑料差。流动性过大时易产生树脂流失与玻纤分头聚积;过小则成型压力及温度将显著提高。影响流动性的因素很多,要评定某种料的流动性,必须按其组成进行具体分析。

#### (2) 收缩率

增强塑料的收缩率比一般压塑料小,它主要由热收缩率及化学结构收缩率构成。影响收缩率的因素首先是塑料品种。一般酚醛料的收缩率比环氧、环氧酚醛、不饱和聚酯等料的要大,其中不饱和聚酯料收缩率最小。其他影响收缩率的因素是塑件形状及壁厚,壁厚则收缩率大;塑料中所含填料及玻纤量大则收缩率小,挥发物含量大则收缩率也大;成型压力大、装料量大则收缩率小;热脱模比冷脱模的收缩率大;固化不足收缩率大;当加压时机及成型温度适当、固化充分而均匀时则收缩率小。收缩率大小还与模具结构有关,总之选择收缩率时应综合考虑。

#### (3) 压缩比

增强料的比容、压缩比都较一般压塑料大,预混料则更大,因此,在模具设计时需取较大的装料室。如采用料坯预成型工艺则压缩比就可显著减小。装料量一般可预先估算,经试压后再作调整。估算装料量的方法可有如下四种:

##### ① 计算法。装料量可按式(15-14)计算:

$$A=V \times G(1+3\% \sim 5\%) \quad (15-14)$$

式中  $A$  为装料量(g);  $V$  为塑件体积( $\text{cm}^3$ );  $G$  为所用塑料密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); 3%~5%为物料按发物、毛刺等损耗量的补偿值。

② 形状简化计算法。将复杂形状的塑件简化成由若干个简单形状组成的塑件,同时将尺寸也相应变更,之后再按简化形状进行计算。

③ 密度比较法。当按金属或其他材料的零件仿制塑件时,可将原零件的材料密度及重量与所选用的增强塑料密度之比求得装料量。

④ 注塑比较法。用树脂或石蜡等浇注型材料注入模具型腔成型后,再以此零件按密度比较法求得装料量。

#### (4) 物料状态

增强料按其玻纤与树脂混合制成原料的方式可分为如下三种状态。

① 预混料。由长达 15~30mm 的玻纤与树脂混合烘干而成。它比容大,流动性比预浸料好,成型时纤维易受损伤,质量均匀性差,装料困难,劳动条件差。适用于压制中小型、复杂形状的塑件及大量生产时;不宜用于压制高强度要求的塑件。使用预混料时要防止料“结”使流动性迅速下降。该料互溶性不良,树脂与玻纤易分头聚积。

② 预浸料。由整束玻纤浸入树脂,烘干切短而成。它流动性比预混料差,料束间相溶性差,

比容小, 玻纤强度损失小, 物料质量均匀性良好, 装模时容易按塑件形状及受力状态进行合理辅料, 适用于压制形状复杂的高强度塑件。

③ 浸毡料。它是将切短的纤维均匀地铺在玻璃布上浸渍树脂而成的毡状料。其性能介于上述①、②两种料之间。适用压制形状简单、厚度变化不大的薄壁大型塑件。

#### (5) 硬化速度及储存性

增强塑料, 按其硬化速度可分为快速和慢速两种。快速料固化快, 装料模温高, 适用于压塑小型塑件及大批量生产。慢速料适用于压制大型塑件、形状复杂或有特殊性能要求及小批量生产。慢速料必须慎重选择升温速度, 过快易发生内应力, 硬化不匀, 填充不良; 过慢则降低生产效率。所以模具设计时应预先了解所用料的要求。

各种料都有其允许储存期及储存条件。凡超期或储存条件不良者都会导致塑料变质, 影响流动性及塑件质量, 故试模及生产时都应引起注意。

#### (6) 塑件模具设计时的注意事项

① 要便于装料, 有利于物料流动填充型腔。

② 脱模斜度宜取  $1^\circ$  以上。

③ 宜选塑件投影面大的方向作为成型加压方向便于物料填充型腔, 但不宜把尺寸精度高的部位和嵌件、型芯轴线垂直方向作为加压方向。

④ 物料渗入力强, 飞边厚不易去除, 选择分型面时应注意飞边方向。上、下模及并镶件宜取整体结构, 组合结构装配间隙不宜取大, 上、下模可拆, 成型零件宜取 3~4 级滑配合。

⑤ 收缩率为  $0\% \sim 0.3\%$ , 一般取  $0.1\% \sim 0.2\%$ , 物料体积一般取塑件体积的 2~3 倍。

⑥ 成型压力大, 物料渗挤力大。模具型芯嵌件应有足够强度, 以防止变形、位移与损坏; 尤其对细长型芯与型腔间空隙较  $h$  更应注意。

⑦ 模具应抛光、淬硬。

⑧ 顶出力大, 顶杆应有足够强度, 顶出应均匀, 顶杆不宜兼作型芯。

⑨ 快速成型料在成型温度下即可脱模, 慢速成型料模具应设有加热及强迫冷却措施。

### 4. 热塑性增强塑料

热塑性增强塑料一般由树脂及增强材料组成。目前常用的树脂主要为尼龙、聚苯乙烯、ABS、AS, 聚碳酸酯、线型聚酯、聚乙烯、聚丙烯、聚甲醛等。增强材料一般为无碱玻璃纤维(有长短两种, 长纤维料与粒料长度一致, 一般为  $2 \sim 3\text{mm}$ , 短纤维料长一般小于  $0.8\text{mm}$ )经表面处理后与树脂配制而成。玻纤含量应按树脂密度选用最合理的配比, 一般为  $20\% \sim 40\%$ 之间。由于各种增强塑料所选用的树脂不同, 玻纤长度、直径、有无含碱及表面处理剂不同, 其增强效果不同, 成型特性也不同。

#### (1) 热塑性增强塑料的性能

① 密度及强度。热塑性增强塑料的密度为  $1.1 \sim 1.6\text{g/cm}^3$ , 仅为钢材的  $1/5 \sim 1/7$ , 比热固性玻璃钢轻  $1/3 \sim 1/4$ 。它能够以较小的单位质量获得更高的机械强度。一般来讲, 不论是通用塑料还是工程塑料, 用玻璃纤维增强后, 都会获得较高的增强效果、提高强度及应用档次。

② 性能的可设计性。热塑性增强塑料的物理性能、化学性能和力学性能, 都可通过合理选择原材料种类、配比、加工方法、纤维含量和铺层方式进行设计。由于热塑性增强塑料的基体材料种类比热固性复合材料多很多, 因而其选材设计的自由度也就大得多。

③ 热性能。一般塑料的使用温度为  $50 \sim 100^\circ\text{C}$ , 用玻璃纤维增强后, 可提高到  $100^\circ\text{C}$ 以上。尼龙 6 的热变形温度为  $65^\circ\text{C}$ , 用 30%玻纤增强后, 热形温度可提高到  $190^\circ\text{C}$ 。聚醚醚酮树脂的耐热性达  $220^\circ\text{C}$ , 用 30%玻纤增强后, 使用温度可提高到  $310^\circ\text{C}$ ; 这样高的耐热性, 热固性复合材料是

达不到的。热塑性增强塑料的线膨胀系数比未增强的塑料低  $1/4 \sim 1/2$ ，能够降低制品成型过程中的收缩率，提高制品尺寸精度。其导热系数为  $0.3 \sim 0.36 \text{W}(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，与热固性复合材料相似。

④ 耐化学腐蚀性。复合材料的耐化学腐蚀性，主要由基体材料的性能决定。热塑性树脂的种类很多，每种树脂都有自己的防腐特点，因此，可以根据复合材料的使用环境和介质条件，对基体树脂进行优选，一般都能满足使用要求。热塑性增强塑料的耐水性优于热固性复合材料。

⑤ 介电性能。一般热塑性增强塑料都具有良好的介电性能，不反射无线电电波、透过微波性能良好。由于热塑性增强塑料的吸水率比热固性玻璃钢小，故其电性能优于后者。在热塑性增强塑料中加入导电材料后，可改善其导电性能，防止产生静电。

⑥ 废料能回收利用。热塑性增强塑料可重复加工成型，废品和边角余料能回收利用，不会造成环境污染。

⑦ 工艺性能。增强料可改善一系列机电性能，但也存在一系列缺点：冲击强度与冲击疲劳强度低（但缺口冲击强度增高）；透明性、焊接点强度也降低；收缩、强度、热膨胀率、热传导率的异向性增大。故目前该塑料主要用于小型、高强度、耐热、工作环境差及高精度要求的塑件。

a. 流动性差。增强料熔融指数比普通料低  $30\% \sim 70\%$ ，故流动性不良，易发生填充不良、熔接不良、玻纤分布不匀等弊病。

b. 成型收缩小、异向性明显。成型收缩比普通料小，但异向性增大沿料流方向收缩小，垂直方向大，近进口处小，远处大，塑件易发生翘曲、变形。

c. 脱模不良、磨损大。该料不易脱模，并对模具磨损大，在注射时料流对浇注系统、型芯等磨损也大。

d. 易发生气体。成型时由于纤维表面处理剂易挥发成气体，必须予以排出，不然易发生熔接不良、缺料及烧伤等弊病。

## （2）热塑性增强塑料的工艺种类

① 注射成型工艺。这是热塑性增强塑料的主要生产方法。该方法历史悠久，应用最广。其生产过程如下：

a. 合模，加料，加热，塑化，挤压。

b. 注射，保压，冷却，固化，定型。

c. 螺杆嵌塑，脱模顶出。

其优点是成型周期短，能耗最小，产品精度高，一次可成型开关复杂及带有嵌件的制品，一模能生产几个制品，生产效率高。缺点是不能生产纤维增强复合材料制品和对模具质量要求较高。根据目前的技术发展水平，注射成型的最大产品为  $5\text{kg}$ ，最小到  $1\text{g}$ ，这种方法主要用来生产各种机械零件、家电壳体、电器材料件等。

② 挤出成型工艺。这是热塑性增强塑料制品生产中应用较广的工艺之一。其主要特点是生产过程连续、生产效率高、设备简单、技术容易掌握等。挤出成型工艺主要用于生产管、棒、板及异型断面型等产品。

③ 缠绕成型工艺。热塑性增强塑料缠绕制品的增强材料是经过浸胶（热塑性树脂）的预浸纱，需要在缠绕机上增加预浸纱预热装置和加热加压辊。缠绕成型时，先将预浸纱加热到软化点，再与芯模的接触点加热，并加压辊加压，使其熔接成一个整体。

④ 拉挤成型工艺。热塑性增强塑料的拉挤成型工艺与热固性玻璃钢基本相似。只要把进入模具前的浸胶方法加以改造，生产热固性玻璃钢的设备便可使用。生产热塑性增强塑料拉挤产品的增强材料有两种：一种是经过浸胶的预浸纱或预浸带，另一种是未浸胶的纤维或纤维带。

⑤ 焊接层合法工艺。此法系利用热塑性增强塑料的可焊性，生产复合材料板材。其方法如下：先在工作台上压铺一层预浸料（一般宽 500mm），铺第二层浸料时，开动压辊的焊接器，使预浸料进入压辊下，焊接器使上下两层预浸料在几秒钟内同时受热熔化，当机器向前移动时，预浸料在压辊的压力（0.3MPa）作用下粘合成一体。如此重复，可生产任意厚度的板材。

⑥ 热塑性片状模塑料制品冲压成型工艺。热塑性片状模塑料制品冲压成型与热固性 SMC 压制成型不同，它得先将坯料预热，然后再放模具加压成型。

### （3）成型注意事项

为了解决增强料上述工艺弊病，在成型时应注意下列事项：

- ① 宜用高温、高压、高速注射。
- ② 模温宜取高（对结晶性料应按要求调节），同时应防止树脂玻纤分头聚积、玻纤裸露及局部烧伤。
- ③ 保压补缩应充分。
- ④ 塑件冷却应均匀。
- ⑤ 料温、模温变化对塑件收缩影响较大，温度高收缩大，保压及注射压力增大，可使收缩变小，但影响较小。
- ⑥ 由于热刚性好，可在较高温度时脱模，但要注意脱模后均匀冷却
- ⑦ 应选用适当的脱模剂。
- ⑧ 宜用螺杆式注射机成型。尤其对长纤维料必须用螺杆式注射机加工。

### （4）模具设计注意事项

- ① 塑件形状及壁厚特别应考虑有利于料流畅通填充型腔，尽量避免尖角、缺口。
- ② 脱模斜度应取大，含玻璃纤维 15% 的可取  $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ ，含玻璃纤维 30% 的可取  $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 。当不允许有脱模斜度时则应避免强行脱模，宜采用横向分型结构。
- ③ 浇注系统截面宜大，流程平直而短，以利于纤维均匀分散。
- ④ 设计进料口应考虑防止填充不足，异向性变形，玻璃纤维分布不匀，易产生熔接痕等。进料口宜取扇形、环形及多点形式，以使料流乱流，玻璃纤维分散，以减少异向性，最好不取针状进料口，进料口截面可适当增大，其长度应短。
- ⑤ 模具型芯、型腔应有足够的刚性及强度。
- ⑥ 模具应淬硬、抛光，选用耐磨钢种，易磨损部位应便于修换。
- ⑦ 顶出应均匀有力，便于换修。
- ⑧ 模具应设有排气溢料槽。

### （5）热塑性增强塑料的连接技术

热塑性增强塑料的连接方法很多，举例如下：

① 铆接。用于热塑性增强塑料铆接用的铆钉，一般都是用连续纤维增强热塑性塑料制造，最好是用拉挤棒材制造。施工时，铆钉预热到可以加压塑变的温度，铆钉与孔径应能严密配合。也可以用金属螺栓。铆接的优点是耐冲击性好，无电化学腐蚀，价格便宜。

② 焊接。热塑性增强塑料的焊接处理，是将被连接材料的焊接表面加热到熔化状态，然后搭接加压，使之接成一体。复合材料焊接原理与塑料焊接相似，但必须注意焊接处的纤维增强效果不能降低很多。

③ 管件对接焊。热塑性增强塑料管的对接焊方法有直接焊对接焊和补强对接焊两种。这种连接方法的优点是工艺简单，可在现场施工，不需对管子进行机械加工，连接强度高，不易断裂。

缺点是成本高,工艺要求严格,要保证尺寸紧密配合。

④ 缠绕焊接。用预浸带沿焊缝手工或机械缠绕,同时用火焰喷枪对接触点加热熔融,使之与被连接件粘牢。选择预浸带时,要注意纤维的方向和含量。此法较实用,被连接材料能保留较好的性能,但易出现加热不均的现象。

⑤ 薄板超声波焊接。此法是用超声波对被连接处进行加热焊接,一般能够获得较高的连接强度。

### 15.2.1.2 常用塑料的工艺特点

#### 1. ABS 塑料

密度:  $1.05\text{g/cm}^3$ ; 成型收缩率:  $0.4\%\sim 0.7\%$ ; 成型温度:  $200\sim 240^\circ\text{C}$ ; 干燥条件:  $80\sim 90^\circ\text{C}$ , 2h。

(1) 无定形料,流动性中等,吸湿大,必须充分干燥,表面要求光泽的塑件须预热干燥 3h。

(2) 宜取高料温、高模温,但料温过高易分解。对精度要求较高的塑件,模温宜取  $50\sim 60^\circ\text{C}$ ; 对高光泽、耐热塑件,模温宜取  $60\sim 80^\circ\text{C}$ 。

(3) 如需解决夹水纹,需提高材料的流动性,采取高料温、高模温等。

(4) 如成型耐热级或阻燃级材料,生产 3~7 天后模具表面会残存塑料分解物,导致模具表面发亮,需对模具及时清理。

#### 2. PS 塑料

密度:  $1.05\text{g/cm}^3$ ; 成型收缩率:  $0.6\%\sim 0.8\%$ ; 成型温度:  $170\sim 250^\circ\text{C}$ 。

(1) 无定形料,吸湿小,不须充分干燥,不易分解;但热膨胀系数大,易产生内应力。流动性较好,可用螺杆或柱塞式注射机成型。

(2) 宜用高料温,高模温,低注射压力,延长注射时间有利于降低内应力,防止缩孔变形。

(3) 可用各种形式的浇口。浇口与塑件要圆弧连接,以免去除浇口时损坏塑件。脱模斜度大,顶出均匀。塑件壁厚均匀,最好不带镶件,如有镶件应预热。

#### 3. PMMA 塑料 (有机玻璃)

密度:  $1.18\text{g/cm}^3$ ; 成型收缩率:  $0.5\%\sim 0.7\%$ ; 成型温度:  $160\sim 230^\circ\text{C}$ ; 干燥条件:  $70\sim 90^\circ\text{C}$ , 4h。

(1) 无定形料,吸湿大,需干燥,不易分解,流动性中等,易发生填充不良、粘模、收缩、熔接痕等。

(2) 宜高压注射,在不出现缺陷的条件下取高料温、高模温,以增加流动性,降低内应力,改善透明性及强度。模具浇注系统表面应光洁,脱模斜度大,顶出均匀,同时设排气口,以防出现起泡。

#### 4. POM 塑料

密度:  $1.41\sim 1.43\text{g/cm}^3$ ; 成型收缩率:  $1.2\%\sim 3.0\%$ ; 成型温度:  $170\sim 200^\circ\text{C}$ , 干燥条件:  $80\sim 90^\circ\text{C}$ , 2h。

(1) 结晶料,熔融范围窄,熔融和凝固快,料温稍低于熔融温度即发生结晶。流动性中等。吸湿小,可不用进行干燥处理。

(2) 摩擦系数低,弹性好,塑件表面易产生皱纹花样的表面缺陷。

(3) 极易分解,分解温度为  $240^\circ\text{C}$ 。分解时有刺激性和腐蚀性气体产生。故模具钢材宜选用耐腐蚀性的材料制作。

#### 5. PP 塑料

密度:  $0.9\sim 0.91\text{g/cm}^3$ ; 成型收缩率:  $1.0\%\sim 2.5\%$ ; 成型温度:  $160\sim 220^\circ\text{C}$ 。

(1) 结晶料,吸湿性小,易发生融体破裂,长期与热金属接触易分解。

(2) 流动性好, 但收缩范围及收缩值大, 易发生缩孔、凹痕、变形。

(3) 冷却速度快, 浇注系统及冷却系统应缓慢散热, 并注意控制成型温度。模具温度低于 50℃ 时, 塑件不光滑, 易产生熔接不良, 90℃ 以上易发生翘曲变形。

(4) 塑料壁厚须均匀, 避免缺胶、尖角, 以防应力集中。

#### 6. PE 塑料

(1) 结晶料, 吸湿小, 不必充分干燥, 流动性极好, 且流动性对压力敏感, 成型时宜用高压注射, 料温均匀, 填充速度快, 保压充分; 不宜用直接浇口, 以防收缩不均, 内应力增大。注意选择浇口位置, 防止产生缩孔和变形。

(2) 收缩范围和收缩值大, 方向性明显, 易变形翘曲, 冷却速度宜慢, 模具设冷料穴, 并有冷却系统。

(3) 加热时间不宜过长, 否则会发生分解、灼伤。

(4) 软质塑件有较浅的侧凹槽时, 可强行脱模。

(5) 可能发生融体破裂, 不宜与有机溶剂接触, 以防开裂。

#### 7. 聚氯乙烯 PVC

密度: 1.38g/cm<sup>3</sup>; 成型收缩率: 0.6%~1.5%; 成型温度: 160~190℃。

(1) 无定形料, 吸湿小, 流动性差。为了提高流动性, 防止发生气泡, 塑料可预先干燥。模具浇注系统宜粗短, 浇口截面宜大, 不得有死角。模具须冷却, 表面镀铬。

(2) 极易分解, 在 200℃ 温度下与钢、铜接触更易分解, 分解时逸出腐蚀、刺激性气体, 成型温度范围小。

(3) 采用螺杆式注射机喷嘴时, 孔径宜大, 以防死角滞料, 如有镶件应预热。

#### 8. PA 塑料 (尼龙)

密度: PA6, 1.15g/cm<sup>3</sup>; PA66, 1.15g/cm<sup>3</sup>; PA1010, 1.05g/cm<sup>3</sup>; 成型收缩率: PA6, 0.8%~2.5%; PA66, 1.5%~2.2%; 成型温度: 220~300℃; 干燥条件: 100~110℃, 12h。

(1) 结晶料, 熔点较高熔融温度范围窄, 热稳定性差, 料温超过 300℃、滞留时间超过 30min 即分解。较易吸湿, 需干燥, 含水量不得超过 0.3%。

(2) 流动性好, 易溢料。宜用自锁时喷嘴, 并应加热。

(3) 成型收缩范围及收缩率大, 方向性明显, 易发生缩孔、变形等。

(4) 模温按塑件壁厚在 20~90℃ 范围内选取, 注射压力按注射机类型、料温、塑件形状尺寸、模具浇注系统选定, 成型周期按塑件壁厚选定。当树脂黏度小时, 注射、冷却时间应取长, 并用白油作脱模剂。

(5) 模具浇注系统的形式和尺寸, 增大流道和浇口尺寸可减少缩水。

#### 9. PC 塑料

密度: 1.18~1.20g/cm<sup>3</sup>; 成型收缩率: 0.5%~0.8%; 成型温度: 230~320℃; 干燥条件: 110~120℃, 8h。

(1) 无定形料, 热稳定性好, 成型温度范围宽, 流动性差。吸湿小, 但对水敏感, 须经干燥处理。成型收缩率小, 易发生熔融开裂和应力集中, 故应严格控制成型条件, 塑件须经退火处理。

(2) 熔融温度高, 粘度高, 大于 200g 的塑件, 宜用加热式的延伸喷嘴。

(3) 冷却速度快, 模具浇注系统以粗、短为原则, 宜设冷料井, 浇口宜取大, 模具宜加热。

(4) 料温过低会造成缺料, 塑件无光泽, 料温过高易溢边, 塑件起泡。模温低时收缩率、伸长率和抗冲击强度均高, 抗弯、抗压、抗张强度低。模温超过 120℃ 时塑件冷却慢, 易变形、粘模。



### 10. PPO 塑料

密度:  $1.07\text{g/cm}^3$ ; 成型收缩率:  $0.3\%\sim 0.8\%$ ; 成型温度:  $260\sim 290^\circ\text{C}$ ; 干燥条件:  $130^\circ\text{C}$ , 4h。

(1) 非结晶料, 吸湿小。

(2) 流动性差, 为类似牛顿流体, 黏度对温度比较敏感, 制品厚度一般在  $0.8\text{mm}$  以上。极易分解, 分解时产生腐蚀气体。宜严格控制成型温度, 模具应加热, 浇注系统对料流阻力应小。

(3) 聚苯醚的吸水率很低 ( $0.06\%$  左右), 但微量水分会导致产品表面出现银丝等不光滑现象, 最好作干燥处理, 温度不可高出  $150^\circ\text{C}$ , 否则颜色会变化。

(4) 聚苯醚的成型温度为  $280\sim 330^\circ\text{C}$ , 改性聚苯醚的成型温度为  $260\sim 285^\circ\text{C}$ 。

### 11. PSU 塑料

密度:  $1.25\sim 1.35\text{g/cm}^3$ ; 成型收缩率:  $0.5\%\sim 0.7\%$ ; 成型温度:  $290\sim 350^\circ\text{C}$ ; 干燥条件:  $130\sim 150^\circ\text{C}$ , 4h。

(1) 无定形料, 吸湿大, 吸水率  $0.2\%\sim 0.4\%$ , 使用前须充分干燥, 并防止再吸湿。保证含水量在  $0.1\%$  以下。

(2) 成型性能与 PC 相似, 热稳定性差,  $360^\circ\text{C}$  时开始出现分解。

(3) 流动性差, 冷却快, 宜用高温高压成型。模具应有足够的强度和刚度, 设冷料井, 流道应短, 浇口尺寸取塑件壁厚的  $1/2\sim 1/3$ 。

(4) 为减小注塑制品产生内应力, 模具温度应控制在  $100\sim 150^\circ\text{C}$ 。成型后可采取甘油浴退火处理,  $160^\circ\text{C}$ ,  $1\sim 5\text{min}$ ; 或采取空气浴  $160^\circ\text{C}$ ,  $1\sim 4\text{h}$ 。退火时间取决于制品的大小和壁厚。

(5) 聚砜在熔融状态下接近于牛顿体, 类似于聚碳酸酯, 其流动性对温度比较敏感, 在  $310\sim 420^\circ\text{C}$  内, 温度每升高  $30^\circ\text{C}$ , 流动性就增加 1 倍, 故成型时主要通过提高温度来改善加工流动性。

### 12. PTFE 塑料 (F4)

密度:  $2.1\sim 2.2\text{g/cm}^3$ ; 成型收缩率:  $3.1\%\sim 7.7\%$ ; 成型温度:  $330\sim 380^\circ\text{C}$ 。

(1) 结晶料, 吸湿小。

(2) 流动性差, 极易分解, 分解时产生腐蚀气体。宜严格控制成型温度, 模具应加热, 浇注系统对料流阻力要小。

(3) 粉状树脂常采用粉末冶金法成型, 烧结温度  $360\sim 380^\circ\text{C}$ , 不可超过  $475^\circ\text{C}$ 。乳液树脂通常用冷挤出再烧结的工艺加工, 可在物品表面形成防腐层。如要求制品透明性、韧性好, 应采取快速冷却。也可采取挤压成型, 可以挤出管、棒、型材。

(4) PTFE 熔体黏度很高, 熔体黏度随剪切应力的增大而减小, 显示其非牛顿流体的特性。

(5) 二次加工, 可以热压复合、焊接、黏结、增强、机械加工等, 以制得最终产品。

### 13. ASA 塑料

密度:  $1.05\text{g/cm}^3$ ; 成型收缩率:  $0.4\%\sim 0.7\%$ ; 成型温度:  $170\sim 230^\circ\text{C}$ ; 干燥条件:  $80\sim 90^\circ\text{C}$ , 2h。

(1) 无定形料, 流动性中等, 吸湿大, 必须充分干燥, 表面要求光泽的塑件须长时间预热干燥  $80\sim 90^\circ\text{C}$ , 3h。

(2) 宜取高料温, 高模温, 但料温过高易分解 (分解温度  $>250^\circ\text{C}$ )。对精度要求较高的塑件, 模温宜取  $50\sim 60^\circ\text{C}$ , 对光泽、耐热塑件, 模温宜取  $60\sim 80^\circ\text{C}$ 。

### 14. PPS 塑料

密度:  $1.36\text{g/cm}^3$ ; 成型收缩率:  $0.7\%$ ; 成型温度:  $300\sim 330^\circ\text{C}$ 。

(1) 无定形料, 吸湿小, 宜干燥后成型。

(2) 流动性介于 ABS 和 PC 之间, 凝固快, 收缩小, 易分解, 选用较高的注射压力和注射速度。模温取 100~150℃。主流道锥度应大, 流道应短。

#### 15. PFA 塑料

密度: 2.13~2.167g/cm<sup>3</sup>; 成型收缩率: 3.1%~7.7%; 成型温度: 350~400℃。

(1) 结晶料, 吸湿小。可采用普通热塑性塑料的加工方法加工成制品。

(2) 流动性差, 极易分解, 分解时产生腐蚀气体。宜严格控制成型温度不要超过 475℃, 模具应加热至 150~200℃, 浇注系统对料流阻力要小。

(3) 半透明粒料, 注塑、挤出成型。成型温度 350~400℃, 475℃以上容易引起变色或产生气泡。要注意脱模会较困难。

(4) 因熔融的材料对金属有腐蚀作用, 长期生产, 模具需要电镀铬处理。

#### 16. PAR 塑料 (U 塑料)

密度: 1.2~1.26g/cm<sup>3</sup>; 成型收缩率: 0.8%; 成型温度: 300~350℃; 干燥条件: 100~120℃, 5h。

(1) 随着制品壁厚增加, 成型收缩率增大。

(2) 吸湿性较小, 约 0.1%~0.3%, 但注塑时微量水分会引起聚芳脂分解。故材料成型前必须进行干燥, 使其含水率小于 0.02%。

#### 17. 酚醛塑料

密度: 1.5~2.0g/cm<sup>3</sup>; 成型收缩率: 0.5%~1.0%; 成型温度: 150~170℃。

(1) 成型性较好, 但收缩及方向性一般比氨基塑料大, 并含有水分挥发物。成型前应预热, 成型过程中应排气, 不预热则应提高模温和成型压力。

(2) 模温对流动性影响较大, 一般超过 160℃时, 流动性会迅速下降。

(3) 硬化速度一般比氨基塑料慢, 硬化时放出的热量大。大型厚壁塑件的内部温度易过高, 容易发生硬化不均和过热。

#### 18. 氨基塑料

密度: 1.5g/cm<sup>3</sup>; 成型收缩率: 0.6%~1.0%; 成型温度: 160~180℃。

(1) 流动性好, 硬化速度快, 故预热及成型温度要适当, 涂料、合模及加压速度要快。

(2) 成型收缩率大。

(3) 含水分挥发物多, 易吸湿、结块, 成型时应预热干燥, 并防止再吸湿; 但过于干燥则流动性下降。成型时有水分及分解物, 有酸性, 模具应镀铬, 以防腐蚀, 成型时应排气。

(4) 成型温度对塑件质量影响较大, 温度过高易发生分解、变色、气泡色泽不均, 温度过低时流动性差, 不光泽。

(5) 料细、比容大、料中充气多, 用预压锭成型大塑件时, 易产生波纹及流纹, 故一般不宜采用。

#### 19. 环氧树脂 (EP)

密度: 1.9g/cm<sup>3</sup>; 成型收缩率: 0.5%; 成型温度: 150~170℃。

(1) 浇注料。流动性好, 硬化收缩小, 但热刚性差, 不易脱模。

(2) 硬化速度快, 硬化时一般不需排气, 装料后应立即加压。

#### 20. 有机硅塑料 (IS)

密度: 1.75~1.95g/cm<sup>3</sup>; 成型收缩率: 0.5%; 成型温度: 160~180℃。

- (1) 流动性好，硬化速度慢，压缩成型时需要较高的成型温度。
- (2) 压缩成型后，须经高温固化处理。

21. HIPS

因 HIPS 分子中含有 5%~15%的橡胶，在一定程度上影响了其流动性，注射压力和成型温度都宜高一些。其冷却速度比 PS 慢，故需足够的保压压力、保压时间和冷却时间。成型周期会比 PS 稍长一点，其加工温度一般在 190~240℃为宜。HIPS 制件中存在一个特殊的“白边”问题，通过提高模温和锁模力、减少保压压力及时间等办法来改善，产品中夹水纹会比较明显。

15.2.1.3 塑胶料常见的不良现象及处理方法

塑胶料常见的不良现象及处理方法见表 15-7。

表 15-7 塑胶料常见的不良现象及处理方法

不良现象	原因	处理办法
充填不足	成型品的体积过大	使用成型能力大的成型机；关闭内腔
	流道、浇口过小	扩展流道或浇口；放快射出速度；增强射出压力
	喷头温度低	喷射空气，以排出冷却的材料；升高材料的温度；改用大型喷头
	材料的温度或者射出压力低	升高材料的温度；增强射出压力；添加外部润滑
	内腔里的流体流动距离过长	设置冷余料注坑；升高材料的温度
	模具温度低	升高模具温度；放快射出速度；增强射出压力
	射出速度慢	升高材料的温度；加强锁模力；加快射出速度；升高材料的温度
	材料的供给量过少	如属螺旋式装置，增加增塑量；而采用柱塞方式时，则增加从料斗落下的数量。减少外部润滑，改进螺旋的加工条件
	排气不良	放慢射出速度。将填充不良的位置改为镶件结构或在模具上加设排气槽。改变胶口的位置；改变成型品的厚度
溢料	锁模力不足	降低射出压力。改用大型成型机。确实调整好连杆
	模具不好	补修导推杆或导钉梢；修正模具安装板。增加支撑柱。使用轨距连杆强度足够的成机；确实做好模具面的贴合
	模具面的杂质	除去杂物
	成型品的投影面积过大	使用大型成型机
	材料的温度过高	降低材料的温度。放慢射出速度
	材料供给量过剩	调整好供给量
	射出压力高	降低射出压力。降低材料的温度
气孔（在材料为充分干燥时，是挥发物或空气所致；大多时候产生在产品胶厚的位置，实际是材料的收缩引起的真空气泡）	流道或浇口过小	将流道或浇口扩展。增强射出压力
	成型品的壁厚差大	尽量使壁厚度要均匀。要使壁厚差不显著
	材料的温度高	降低材料的温度。要改进发生气孔的部位的冷却条件
	离浇口的流动距离长	增强射出压力。加快射出速度。在成型品上设置棱或厚层部位
	脱模过早	延长冷却时间
	射出压力低	增强射出压力
	冷却时间短	延长冷却时间。降低模具温度
	保压不充分	延长保压时间。增强保压压力
波纹	材料流动不畅	升高材料的温度。换用流动性高的材料。增强射出压力。设定冷料井。加速射出速度
	模具温度低	采用热油机或热水机提高模温
	进浇口过小	加大进浇口。升高材料的温度

续表

不良现象	原因	处理办法
银条纹	水分或挥发成分	使材料充分干燥。使用料斗式装载机
	材料的温度过高	降低材料的温度。放慢射出速度
	模具温度低	升高模具温度
	排气不良	在模具耦合面加上排气用的条缝。放宽模具与推挺钉梢的间隙。设置真空排气结构间隙
	成型品或模具设计不良	放大浇口或流道。消除急剧的壁厚差现象。将耦合部位加圆, 防止乱流现象的产生。降低注射速度和注射压力
	模具面上的水分或挥发成分	防止模具被过分冷却。减少润滑剂或脱模剂
	混入夹杂的材料	严格材料管理
	螺桨运转不当	降低旋转数。升高增塑中的背压
表面昏暗	润滑或挥发成分过多	升高材料的温度, 并使用较高的模具温度。加速射出速度。增强射出压力
	脱模剂过多	材料要干燥好。减少润滑剂。升高材料的温度
融合线 (实际是 2 股或多股材料汇合时, 材料的融合线。与材料汇合时的黏度有很大的关系)	材料的温度过低	升高模具温度
	浇口设计不当	改用圆形或扇形进胶口。扩大浇口; 更改浇口位置, 使融合线的位置改变
	材料里挥发成分或脱模剂过多	材料要干燥好; 减少脱模剂, 在材料的汇合处增加排气槽。改善内腔里的排除条件
	材料的凝固快	升高材料的温度; 升高模具温度; 增强射出压力; 加速射出速度; 设置余料注坑
	成型品设计不良	在融合部位设棱; 加厚成型品的壁层
气泡 (在材料为充分干燥时, 是挥发物或空气所致; 大多时候发生在产品胶厚的位置)	浇口或流道过小	扩大浇口或流道, 将进胶位置改到容易产生收缩或气泡的位置。提高模具的温度
	射出压力低	增强射出压力; 延长保压时间
	过剩的水分	使材料充分干燥
	成型品设计不良	消除壁厚的剧变部位
	排气不良	在容易产生捕捉空气的部位设置推挺钉; 实行真空排气
黑条纹及烧痕 (实际是材料受到高温、高压的作用出现分解烧焦的现象)	材料过热	降低材料的温度; 缩短成型周期; 使用小型成型机; 减少螺桨的旋转数
	成型机不良	消除炮筒内螺杆和炮筒的伤痕; 消除螺桨的伤痕; 检查螺杆止流环是否有破损
	模具浇口小、排气不良	扩大浇口; 放慢射出速度; 扩大推挺钉与模具的间隙; 在模具耦合面加上排气用的条缝; 采用真空排气法
龟裂 (实际是材料由无规则状态被注塑成型为特定形状时, 内部的分子结构产生的内应力所致)	射出压力过强	减弱射出压力
	材料的流动不畅	升高材料的温度; 使用模具机提高模具温度; 避免壁厚的急剧变化; 将边角部分加圆
	推挺钉在厚层部位	改变推挺钉的位置; 将模具分割为三块
	保压的调整不良	减少保压压力; 缩短保压时间; 使用浇口阀; 喷头上使用单向阀
	热性裂痕大	进行成型品的退火后处理, 对于有金属镶件的塑料成型, 需预先加热镶件
	化学药品的侵蚀	不用侵蚀性溶剂擦拭内腔, 洗涤嵌衬
离模溢料	浇口设计不当	修正浇口, 使之向料薄方向流; 扩大浇口的断面积; 改为翼片浇口
	射出速度快、材料温度低、模具温度低	减慢射出速度、升高材料温度、升高模具温度

续表

不良现象	原因	处理办法
弯曲（实际是材料的收缩不均匀所致）	冷却不充分	延长冷却时间；降低模具温度
	冷却不均匀	尽量使成型品的壁厚均匀；减少型腔与模芯温差，产品会向温度偏高的模具方向弯曲变形。缩小棱；修正冷却水槽沟
	射出压力不适宜	调到弯曲最小的压力，同时注意分段压力对产品变形的影响
	浇口位置不适当	设置到薄层部位
	模芯偏倚	修正模芯；改为多点浇口
脱模不良	模具温度调整不良	升高内腔一侧的模具温度
	来自模芯的通气不良	扩大推挺钉与模具的间隙。使用脱模剂。实行压缩空气脱模
	模具的强度不够	降低射出压力。改造模具
材料的叠边不良	料斗的落料不佳	为料斗配上震荡器螺旋滤清器。增多外部润滑剂
	粉碎的回收材料拌入量过多	筛选粉状物
	外部润滑剂过剩	减少润滑剂的量。采用二轴螺旋桨式射出成型机

15.2.2 其他塑料工艺

15.2.2.1 塑料涂层被覆前处理

前处理包括塑料表面的除油处理，即清洗表面的油污和脱模剂，以及塑料表面的活化处理。目的是提高涂层被覆的附着力。

（1）塑料制品的除油

与金属制品表面除油类似，塑料制品除油可用有机溶剂清洗或用含表面活性剂的碱性水溶液除油。有机溶剂除油适用于从塑料表面清洗石蜡、蜂蜡、脂肪和其他有机性污垢，所用的有机溶剂应对塑料不溶解、不溶胀、不破裂，其本身沸点低，易挥发，无毒且不可燃。

碱性水溶液适用于耐碱塑料的除油。该溶液中含有苛性钠、碱性盐以及各种表面活性物质。最常用的表面活性物质为 OP 系列，即烷基苯酚聚氧乙烯醚，它不会形成泡沫，也不残留在塑料表面上。

（2）塑料制品表面的活化

这种活化是为了提高塑料的表面性能，在塑料表面生成一些极性基或加以粗化，以使涂料更易润湿和吸附于制件表面。表面活化处理的方法很多，如化学氧化法、火焰氧化法、溶剂蒸汽浸蚀法和电晕放电氧化法等。其中，最广泛使用的是化学氧化处理法，此法常用的是铬酸处理液，其典型配方为重铬酸钾 4.5%，水 8.0%，浓硫酸（浓度为 96%以上）87.5%。用铬酸处理液浸蚀的优点是无论塑料制品的形状多复杂，都能处理均匀；其缺点是操作有危险，并有污染问题。

15.2.2.2 塑料焊接工艺

永久性联结的塑料零件的装配可采用焊接方法。根据模塑零件的几何形状、所用原料、成本、装配部位所要求的机械性能和外观质量等选择焊接方法。

1. 焊接方法和特点

在大规模生产中，常用的塑料工程零件的焊接方法，有高温工具焊接、旋转焊接、振动焊接和超声焊接。其他方法，有高频焊接、感应焊接、热气焊接和激光焊接。在各种焊接方法中，都要使用加热（使塑料表面熔化再粘接）和加压。通常通过接触或辐射发热、内部或外部摩擦发热，或用电加热等方式提供热量。

从理论上讲,所有热塑性塑料都是可以焊接的。但是,有时塑料的焊接性能相当不同。非晶态聚合物和半结晶聚合物不能焊接在一起。由于水气会影响焊接质量,所以尼龙等吸水性塑料焊接前需要预先干燥。为了保证焊接质量,尼龙零件最好注塑后立即焊接,或焊接前将之放在干燥环境中。玻璃纤维和稳定剂等树脂添加剂同样会影响焊接质量。选择适宜的工艺参数和零件设计,未增强塑料的焊接装配件的强度可以和其原料相媲美。对于玻璃纤维增强塑料而言,在焊接区域上,由于纤维分离和再取向使得强度减弱,这一点在设计中必须予以考虑。

半结晶聚合物熔点变化剧烈,当加热时,聚合物瞬间从固相转变成液相。因此,对半结晶塑料的超声焊接,最好使用剪切焊接。由于非晶态塑料有一个软化范围,所以非晶态塑料的焊接设计相对次要些。靠着接触点之间距离的不同,超声波将摆动传至工件内,并使接触面间粘合连接起来。总的来说,近声场焊接对所有塑料都会有很好的效果。对于低弹模数塑料的焊接最好采用近声场焊接方法。

薄壁零件设计时需要在零件双方之间加入一个导槽,这样,当使用一定的焊接压力时,零件壁不会移动而偏离预定位置。

## 2. 超声波焊接

在进行超声波振动的同时施加压力,使要结合的塑料产品的一部分因摩擦生热而软化,焊接在一起。

### (1) 分类

① 斜面接合。它是利用斜面以达到完全的面接合。由于可获得均一的热能及较大的焊接面积,故焊接强度高,气密性好。

② 逐次接合。它属于剪切焊接,由振动方向的面接触结合部获得均一的热量,其气密性和焊接强度都很好。但是,焊接后所产生的飞边会滞留在表面,特别是不允许有飞边产生时,一定要注意。

③ 剪切接合。它介于上面所说的斜面接合与逐次接合之间,由于气密性好,能有效地焊接圆形以外的形状,因而经常被使用。

④ 能源定向接合。能源定向结合是将能源集中在被称为定向的三角形的凸起部分,由反复冲击产生的热量实现接合。其优点是形状简单,接合部分的限制较小。

### (2) 焊接条件

目前市场上有各种类型的焊接机,但必须根据所焊接产品的形状和尺寸选择合适的机型。

使用圆柱形工具对成型品进行加压,一般压缩空气压力为  $0.1\sim 0.3\text{MPa}$ ,有时会更一些;但压力过高会阻碍圆柱形工具的振动。对玻璃纤维增强材料进行焊接时,可适当提高压力以得到良好的焊接制品。

焊接时间因材料的种类与制品的形状而异。时间过长会造成过度焊接而产生大量的飞边与气泡,从而导致气密不良。

## 15.2.2.3 塑料着色工艺

配色就是在红、黄、蓝三种基本颜色基础上,配出令人喜爱、符合色卡色差要求、在使用中不变色的色彩。另外塑料着色还可赋予塑料多种功能,如提高塑料耐光性和耐候性;赋予塑料某些特殊功能,如导电性、抗静电性。

### 1. 着色剂

着色剂主要分颜料和染料两种。颜料是不能溶于普通溶剂的着色剂,故要获得理想的着色性能,需要用机械方法将颜料均匀分散于塑料中。按结构可分为有机颜料和无机颜料。无机颜料热

稳定性、光稳定性优良,价格低,但着色力相对差,相对密度大;有机颜料着色力高、色泽鲜艳、色谱齐全、相对密度小,缺点为耐热性、耐候性和遮盖力方面不如无机颜料。染料是可用于大多数溶剂和被染色塑料的有机化合物,优点为密度小、着色力高、透明度好,但其一般分子结构小,着色时易发生迁移。

白色颜料主要有钛白粉、氧化锌、锌钡白三种。钛白粉分金红石型和锐钛型两种结构,金红石型钛白粉折射率高、遮盖力高、稳定、耐候性好。

炭黑是常用的黑色颜料,价格便宜,还具有对塑料的紫外线保护(抗老化)作用和导电作用。不同的生产工艺可以得到粒径范围极广的各种炭黑,它们的性质差别也很大。炭黑按用途可分为色素炭黑和橡胶补强用炭黑,色素炭黑按其着色能力又分为高色素炭黑、中色素炭黑和低色素炭黑。

珠光颜料又叫云母钛珠光颜料,是一种二氧化钛涂覆的云母晶片。根据色相不同,可分为银白类珠光颜料、彩虹类珠光颜料、彩色类珠光颜料三类。

## 2. 配色着色工艺

配色着色,可采用色粉直接加入树脂法和色母粒法。色粉与塑料树脂直接混合后,送入下一步制品成型工艺,工序短,成本低,但工作环境差,着色力差,着色均匀性和质量稳定性差。

色母粒法,是将着色剂和载体树脂、分散剂、其他助剂配制成具有一定浓度的着色剂粒料,制品成型时根据着色要求,加入一定量色母粒,使制品含有要求的着色剂量,达到着色要求。色母粒可以按待着色树脂分类,如 ABS 色母粒,PC 色母粒,PP 色母粒等;也可按着色树脂加工工艺分类,有注塑、吹膜、挤出级三大类色母粒。由于对颜料先进行预处理,因而色母粒有较高的着色力,用量可降低且质量稳定,运输、储存、使用方便,环境污染大为降低。分散剂通过对颜料的润湿、渗透来排除表面空气,将凝聚体、团聚体分散成细微、稳定和均匀的颗粒,并在加工过程中不再凝聚。常用的分散剂为低分子量聚乙烯蜡,对于较难分散的有机颜料和炭黑可采用 EVA 蜡或氧化聚乙烯蜡。其他助剂有偶联剂、抗氧剂、光稳定剂、抗静电剂、填料等,视要求和品种而确定加入量,称为多功能母粒。例如,加入光亮剂,有利于模塑制品脱模和提高制品表面光亮度。

色母粒的性能指标有色差、白度、黄度、黄变度、热稳定性、氧指数、熔体流动速率等。当然颜料的细度、迁移性、耐化学性、毒性也与色母粒性能有关,有些指标在专门用途中十分重要,如纤维级母粒的压滤值(DF 值)细度。

## 3. 配色管理和仪器

配色管理的硬件有测色计和处理测得数据的计算机。测色计可分为分光光度计和色差计两种,用它代替人眼测定色彩,去除人为因素对测定结果的影响。分光光度计用来测定各波长对完全漫反射面的反射系数,不能直接求得色度值或色差,但通过其对数据处理便可评价色度值及其他各种参数值。分光光度计可分为采用衍射光栅分光和采用干涉滤光片分光两种类型。先进的内装微处理器的分光光度计,具有 0%、100% 的自动校正及倍率增加等功能,从而提高了精度。

色差计是一种简单的测试仪器,即制作一块具有与人眼感色灵敏度相等的分光特性的滤光片,用它对样板进行测光;其关键是设计一种具有感光器分光灵敏度特性并能在某种光源下测定色差值的滤光片。色差计体积小、操作简便,较适宜对分光特性变化小的同一种产品作批量管理,带有小型微计算机的色差计,容易用标准样板进行校正和输出多个色差值。

配色管理软件提供分光反向率曲线分析、色差公式计算、条件色表示法、遮盖力表示法和雾度表示法等。选择着色剂时,用分光反射率曲线帮助分析,但不能用来判断颜色的一致度。色差值是色彩管理中最重要指标之一,但不同的色差公式求得的色差值各不相同,因此,必须注明所用色度体系或色差公式。

#### 4. 电脑配色

利用计算机进行调色配方及其管理已成功用于塑料配色调色。电脑配色仪具有下列功能：

(1) 配色 根据要求建立常用颜(染)料数据库(制备基础色板并输入)。然后在软件菜单下把来料色板输入计算机,在键盘中点出数个候选颜料,立刻计算出一系列配方,并分别按色差和价格排序列出,供配色选择。

(2) 配方修正 修正计算机所列出的配方和其他来源配方。当色差不合格时,利用显示器显示的不一致的反射曲线,直接通过键盘增减颜料量,直至两条曲线基本重合,得出修正后的配方。

(3) 颜色测量和色差控制 测量着色剂的着色强度、产品的白度、产品颜色牢度、颜色色差。由于计算机能定量表述颜色的性能指标,有利于双方的信息沟通和传递。

(4) 颜色管理 日常工作中的色样、配方、工艺条件、生产日期和用户等信息均可存入计算机,便于检索、查找和作为修改时的参考。借助于计算机进行颜色管理,方便、快捷,工作效率高,且便于保密。



## 第 16 章 电子设备整机装配技术

整机装配，是指在各部件、组件安装和检验合格的基础上，进行整机联装，通常也称总装。总装是电子设备生产过程中的一个主要生产环节。

### 16.1 整机通用装配技术

#### 16.1.1 概述

现代电子设备系统庞大。为了便于组装、维修和更换，设计时通常采用分立的电路单元或分立的分机结构形式。在单元与单元、分机与分机、分机与机柜、机柜与机柜之间，多采用各种类型的接插件及连接器进行电气连接。这些连接形式利用了连接器的各种结构形式，使单机或机箱、机柜结构紧凑、联装快速、电气可靠、维修方便，有利于大批量生产。

##### 16.1.1.1 整机联装的内容和要求

###### 1. 整机联装的内容

整机联装或称总装，包括机械的和电气的两大部分工作。具体来说，总装的内容，包括将各部件、整件（如各机电元件、印制电路板、底座、面板以及装在它们上面的元件）按照设计要求，安装在不同的位置上，组合成一个整体，再用导线（线扎）将元、部件之间进行电气连接，完成一个具有一定功能的完整的机器，以便进行整机调整和测试。

总装的连接方式可归纳为两类，一类是可拆卸的连接，即拆散时不会损伤任何零件，它包括螺钉连接、柱销连接、夹紧连接等。另一类是不可拆连接，即拆散时会损坏零件或材料，它包括锡焊连接、胶粘、铆钉连接等。

总装的装配方式，以整机结构来分，有整机装配和组合件装配两种。对整机装配来说，整机是一个独立的整体，它把零、部、整件通过各种连接方法安装在一起，组成一个不可分的整体，具有独立的功能，如收音机、电视机、信号发生器等。而组合件装配则是将若干个组合件进行组合；每个组合件都具有一定的功能，随时可以拆卸，如大型控制台、插件式仪器等。

###### 2. 整机装配的基本要求

整机联装的目标，是利用合理的安装工艺实现预定的各项技术指标。整机安装的基本原则，是先轻后重、先铆后装、先里后外、先低后高、易碎后装，上道工序不得影响下道工序的安装。对安装的基本要求是牢固可靠、不损伤元件、不破坏元器件的绝缘性能，安装件的方向、位置要正确。

电子设备的装配工艺在产品制造的过程中具有重要的意义。它直接影响到各项技术指标能否实现或能否用最合理、最经济的方法实现。如果在结构设计中工艺性考虑不周，不仅会给生产造成困难，还将直接影响生产率的提高。因此，在产品制造过程中，要特别重视结构装配工艺，主要要求如下：

(1) 结构装配工艺应具有相对的独立性。整机结构安装通常是指用紧固件和胶黏剂将产品的零、部、整件按设计要求装在规定的位置上。由于设备组装采用分级组装, 整机中各分机、整件和部件的划分, 不仅在电气上具有独立性, 而且在组装工艺上也应具有相对的独立性; 这样不仅便于组织生产, 也便于整机的调整和检验。

(2) 机械结构装配应有可调节环节, 以保证装配精度。

(3) 结构装配中所采用的连接结构, 应保证安装方便和连接可靠。并尽可能采用有效的新型连接结构, 如压接、胶合、快速拆卸连接等。

(4) 结构装配应便于设备的维修。电子设备中需要经常调节或更换的元器件, 应保证装拆及更换方便, 并且在更换及调整时不应影响其他元器件或部件。此外, 还应考虑在整机维修时, 容易打开, 便于观察、修理。

(5) 线束的固定和安装要有利于组织生产, 并使整机装配整齐、美观。线束固定要牢固可靠, 要求在外界机械力的作用下不会变形和位移。线缆要布放在底座下面或机架的边沿等看不见的地方。

(6) 要合理使用紧固件。一般, 整机中使用紧固件少, 工艺性就好, 紧固件使用愈合理, 工艺性就愈好; 而合理使用紧固件对产品的可靠性也有很大的影响。

(7) 提高电子设备中元器件及结构件本身的抗振动、抗冲击能力, 采取隔振措施, 保证电子设备在外界机械因素影响下仍能可靠地工作。

(8) 应保证电子线路连接的可靠性。在装配中, 电子线路连接的主要方法是焊接; 焊接质量直接影响产品的电性能和可靠性。因此装配中的焊接工艺十分重要。

(9) 操作、调谐机构应能精确、灵活地工作, 人工操作手感要好。

#### 16.1.1.2 机柜装配工艺设计要点

机柜装的图纸如同装联中的其他图纸一样, 是一种工程语言。图纸设计好之后不需要工艺人员、线路设计人员到现场进行指导, 由操作人员照图施工, 最后交检, 通电调试即成。如何才能设计好机柜装配图呢? 下面这些设计指南可供参考。

(1) 对机柜的结构形式要有所了解。

(2) 对机柜中装有多少层机箱, 它们的电特性和功能对布线有何要求, 工艺师应心中有数。

(3) 布线槽是怎样的一种形式。

(4) 机柜中各分机的电缆座位置及顺序、方向。

(5) 柜顶、柜底的电气结构情况如何。

(6) 机柜由几个分机组成, 多机柜间的电缆或线束如何连接。

(7) 对车载机柜, 哪些电缆或线束在装车前做, 哪些在车上才能做, 图纸要清楚地表达出来。

(8) 机柜中通往天线的电缆, 是否考虑天线电缆的暴露情况, 需不需要防雨、防潮、工艺如何对其采取相应措施。

(9) 天线电缆或通往天线的线束在随天线的升降机构运动时, 如何布设这些需活动的电缆和线束。

(10) 需装载到车船的机柜, 如何与车船上的外部进行电气连接, 其可靠性如何。

(11) 设计机柜线缆布局图, 要求操作者先从柜顶下来, 还是先从柜底上去; 如何在机柜连接图上简明设计出 (与结构师设计有区别) 电缆头、电缆头芯数、针头还是孔头 L8 头、还是 SMA 头、N 型头还是 L16 头, 使装机者找线缆时快速准确, 使检验者一目了然。搞清上述问题后, 就可以动手设计机柜的线缆布局图了。

16.1.1.3 电子装联常用的连接器

1. 焊接型连接器的种类及构成识别

常用低频电缆连接器的种类有 P 型、Q 型、X 型和 XK 系列型等。这些都是小圆形焊接型电连接器。它们的特点是质量轻、体积小、接触偶密度较高、连接分离速度快、密封性能好、可靠性高, 广泛用于航空、兵器、各种电子设备等。下面就这些类型的连接器作简单介绍。

(1) P 型连接器

P 型系列连接器是一种普通圆形的, 采用螺纹连接, 接触偶有镀金、镀银之分。符合 HB-77-83、SJ/T10496-94 等标准的要求。其使用条件和主要性能如下:

环境温度:  $-60\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。

相对湿度:  $20^{\circ}\text{C}$ , RH 98%。

大气压力: 达 2kPa。

振动: 频率  $10\sim 200\text{Hz}$ 。加速度达  $98\text{m/s}^2$ 。

冲击: 频率  $40\sim 100$  次/min, 加速度达  $68\text{m/s}^2$ 。

恒加速度:  $245\text{m/s}^2$ 。

额定电压: 大气压力 2kPa 时达 250V (400Hz); 大气压力 10kPa 时达 500V (400Hz)。

绝缘电阻:  $\geq 20\text{M}\Omega$  (常温);  $\geq$

$2\text{M}\Omega$  (湿热)。

气密性: 密封插座内外介质间的

压力差不超过 101kPa。

机械寿命: 插拔 500 次。

接触电阻与额定电流见表 16-1。

P 型连接器的命名如图 16-1 所示。

表 16-1 接触电阻与额定电流

接触偶直径 $D$ (mm)		1.5	2.5	3.5	5.5	9.0
接触电阻 $R$ ( $\Omega$ )		0.0025	0.001	0.0005	0.0003	0.00016
额定电流 $I$ (A)	1~20 对	10	25	50	100	200
	21~30 对	8	20	40	80	—
	31~48 对	7	16.5	35	70	—

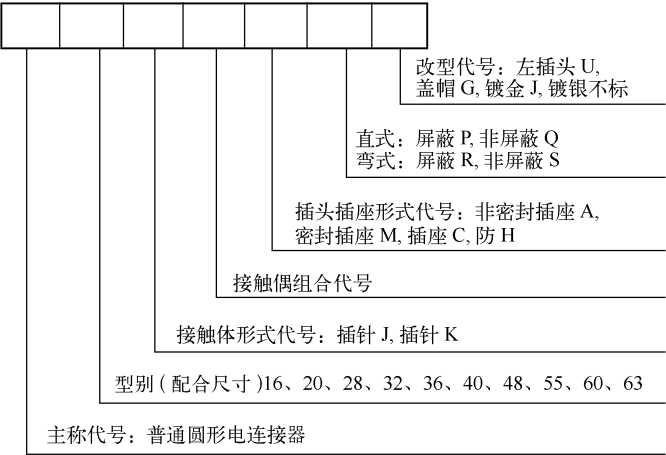


图 16-1 P 型连接器的命名

(2) X 型连接器

X 型系列连接器采用小圆形的螺纹连接形式，符合 SJ1643-81 标准。含密封、防水、直式和弯式等规格品种。它们的接触偶直径有  $D1\text{mm}$ 、 $D1.5\text{mm}$ 、 $D2\text{mm}$ 、 $D3\text{mm}$  镀金，接触偶数从 4~55。主要技术参数如下：

环境温度：-55~100℃；-55~85℃（密封，防水）。

相对湿度：40℃，达 RH 98%。

大气压力：0.6~505.4kPa。

振动：频率 5~2 000Hz，加速度  $167\text{m/s}^2$ 。

冲击：加速度达  $343\text{m/s}^2$ 。

额定电压：400V；200V（0.6kPa 时）。

绝缘电阻： $\geq 5\,000\text{M}\Omega$ （常温）； $\geq 20\text{M}\Omega$ （湿热）； $\geq 500\text{M}\Omega$ （密封插座）。

单脚分离力：接触偶直径  $D_1$ ：0.78~3.5N； $D_2$ ：2.94~6.5N； $D_3$ ：3.94~8.5N。

表 16-2 额定电流与接触电阻

接触偶直径 $D$ (mm)	1.0	1.5	2	3
接触电阻 $R$ ( $\Omega$ )	0.005	0.002	0.001	0.0005
工作电流 $I$ (A)	3	10	16	30

注：密封插头接触电阻不大于上述规定值的 3 倍

X 型连接器的命名如图 16-2 所示。

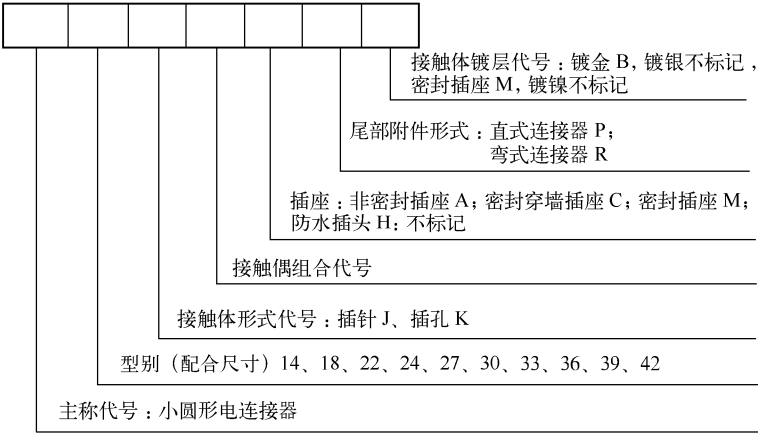


图 16-2 X 型连接器的命名

(3) Q 型连接器

Q 型连接器是卡口小圆形插头座，它的连接方式为卡口连接。其界面配合间隙较大，但具有体积小、能快速连接及拧下等特点，符合 SJ/T2026—82 和 GJB266—87 等标准。有直式、弯式、面板安装式、防雨型等规格。主要技术参数如下：

环境温度：-55~100℃。

相对湿度：温度为 40℃时，达 $(93\pm 3)\%\text{RH}$ 。

大气压力：1kPa。

振动：频率 10~2 000Hz， $160\text{m/s}^2$ 。

冲击：加速度达  $500\text{m/s}^2$ 。

总分离力：不大于单脚分离力上限值总和的 1.5 倍（密封、密封穿墙为 2 倍）。

气密封：内外介质压力差为 161.9kPa。

机械寿命：插拔 500 次。

额定电流与接触电阻见表 16-2。

绝缘电阻： $\geq 500\text{M}\Omega$ 。

耐压：1 500V（50Hz）。

机械寿命：1 000 次。

额定电流见表 16-3。

X 型和 Q 型的连接器在安装尺寸、外形、接触体上几乎都是一样的，不同之处：一个是螺

纹连接，一个是卡口连接。Q 型连接器和 X 型连接器的命名规则基本相同。下面以一个示例加以说明，见图 16-3。

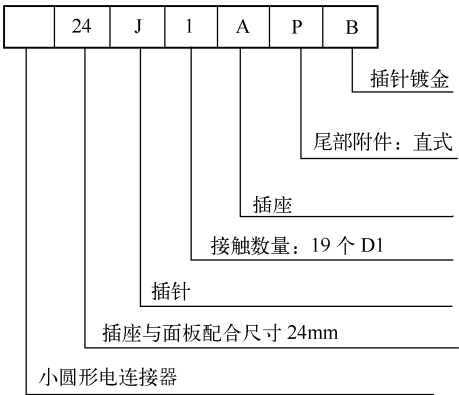


图 16-3 Q 型连接器命名示例

表 16-3 额定电流

接触偶直径 $D$ (mm)	电流 $I$ (A)	电压 $U$ (V) $\leq 400$	
		接点中心距 $\geq 3.5\text{mm}$	接点中心距 $2.8\text{mm}$
1	3	300V	400V
1.5	10		
2.5	25		

(4) XK 系列电连接器

XK 系列电连接器是小圆形焊接电连接器。其插头与插座的连接方式为卡扣连接，其结构符合 MIL-C-26489。该系列的插头、插座可与 XKE 系列插头、插座（压接型）互配使用。有非密封、密封品种，尾部附件有进式压线支架和屏蔽两种结构形式。此系列连接器除上述连接器使用领域外，在我国军用航空设备中使用极为广泛。主要技术参数如下：

环境温度： $-60\sim 160^{\circ}\text{C}$ 。

相对湿度：温度为  $40^{\circ}\text{C}$  时，(95%~98%)RH。

气密性：密封插座内外介质间的压力差 $\geq 0.2\text{MPa}$ 。

振动：频率  $10\sim 200\text{Hz}$ ，加速度  $98\text{m/s}^2$ 。

离心加速度： $245\text{m/s}^2$ 。

绝缘电阻：正常条件 $\geq 500\text{M}\Omega$ ；湿热条件 $\geq 20\text{M}\Omega$ 。

工作电压：海平面 500V；25 000m，250V。

抗电强度：1 500V 持续 1min。

壳体接触电阻： $\leq 0.01\Omega$ 。

机械寿命：连接分离 500 次。

额定电流见表 16-4。

表 16-4 额定电流

针孔规格 $D$ (mm)							
1		1.5		2		3	
实际通电针孔数 (个)	允许电流 (A)	实际通电针孔数 (个)	允许电流 (A)	实际通电针孔数 (个)	允许电流 (A)	实际通电针孔数 (个)	允许电流 (A)
1~16	5	1~10	10	1~5	20	1~2	40
16~29	4.5	11~16	9	6~10	18	3~4	36
30~40	4	16~20	8			5~6	32
41~61	3.5	21~26	7				

型号命名示例见图 16-4。

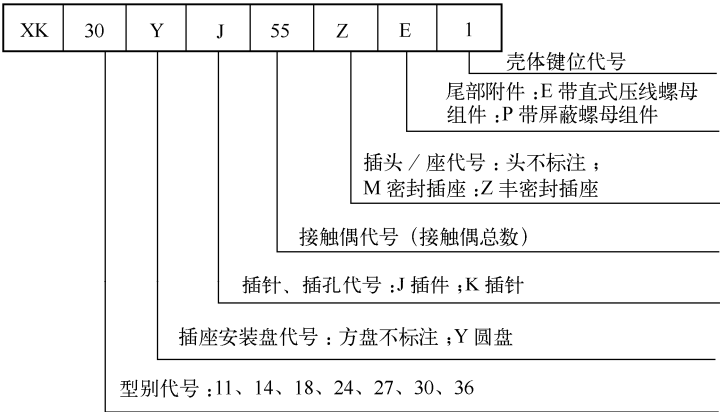


图 16-4 型号命名示例

## 2. 压接型连接器

连接插头/座的电缆，其工艺方法大部份是采用焊接。产品的质量优劣取决于焊接的质量好坏，依赖的是操作者技术水平的高低。因此，在电缆的制造上，焊接工艺存在着不易保证质量、不便维修、装焊时需各种模夹具、受环境影响较大、增加产品重量（特别是航空设备重量要求严格）等问题。

压接型连接器顾名思义，是一种非焊接的连接形代。它的接触偶是可以从插座/头中取出来，借助工具将导线与它进行连接，实现电气的导通。这是一种冷压接形式，又可称为“咬接”，它是在自然环境中用机械的方法将导线与被连接器进行冷压接。压接的质量由压接工具来保证。只要压接工具调整好，任何操作者只要按照压接规范来操作，均可以装出合格的电缆，产品的质量是由工具来保证的，不再依赖操作者的技术水平高低。

### (1) 压接端接及其特点

冷压端接是借助可控制的压力，使插针/孔的尾部与导线线芯一起产生塑性变形，从而排除掉插针/孔和导线线间的间隙而紧密地连接在一起，达到冷压端接的目的。这里所说的塑性变形，主要是指插针/孔的尾部接线端的塑性变形，它应是均匀的，并且是能够控制变形量的金属塑性变形。

压接是由专用工具来实现的（有手动压接钳、气动压接钳）。装联中大多用的是手动压接钳，压接的施压状况和压接承窝形式是多样的，有单窝、双窝、三窝、四窝之分。装联中一般采用的是四窝压接形式（也有用 3 窝的），用有四个压头的手动压接钳来压接导线，表现在压接件上为四窝。

插针/孔与导线的压接，需要一定的操作空间。因此压接型连接器的插头/座针/孔通过专用的取送工具都是可以取送的，即可将插针/孔取出插头座外，与导线压接好后，再送入插头或插座内，并可获得可靠的定位（有定位爪）。正因为压接型连接器的接触偶（插针/孔）是可以从连接器中取出与导线进行连接的，所以这种连接器的接触偶和焊接型连接器相比，可以做得很密。

压接型连接器有以下优点：接触偶排列密度提高，可使插头/座小型化；不用电源加热，节省能源，适应冬季外场作业，操作方便，生产效率高；不用锡焊和助焊剂，不会带来环境污染，改善了工作条件，减轻了设备重量。压接的连接器在耐热、抗冲击、可靠性等方面，效果均优于焊接产品。

压接型连接器的缺点：一个插针/孔只能压接一次，需要有备份；对导线的规格要求严格，因为什么规格的针/孔只能配相应要求的导线；单个针/孔不能同时压接双线。

压接型连接器在英、美、法等发达国家中使用得十分普遍,不仅仅用于军用飞机,在民用机和直升机中也广泛使用,焊接型的连接器已处于逐渐被淘汰的地位。

### (2) 冷压接对工具的要求

压接工具是直接实现压接端接最关键的机械装置。压接工具的精度、调节、操作与维护等都直接影响压接端接的质量:电气连接和机械连接的可靠性、压接形变的大小和压接损伤的程度等。因此,对压接工具应提出以下具体要求:

- ① 压接工具的各个活动部位应活动自如,不应出现卡死现象。
- ② 在操作中,压头未压到预定位置时,压接钳手柄不应松开(若压不到位,压头不能退回,压接件也是取不出来的)。
- ③ 要正确地控制插针/孔放进压接工具的深度(要求插针/孔一定要插到底)。
- ④ 使用压接工具压接后的压接件,其压接部位不能出现压裂、压穿现象(可用 3~5 倍放大镜进行观察)。
- ⑤ 使用压接工具压接后的压接件,在送入连接器中时不应影响正常的装配取送。

### (3) 使用压接型连接器应注意的问题

在装联实际使用中压接工具多称为压接钳。压接钳一般都装有调节压痕深度的装置,这种装置是通过调节压接钳手柄上的刻度标记调节盘得到不同压头的工作位置,以适应压接不同型别的压接筒和与之适配的各种截面的导线。它以操作者手的握力为工作动力。首先要根据产品所需的线径来选取与之适配的接触偶和压接工具的挡位。这要根据具体的连接器,选取好压接钳后,制定出一个压接规范(或实施细则),再指导生产。

压接代替焊接后,对导线的切剥要比焊接有更严格的要求。因为没有焊料作填充物,导线与接触偶一起产生金属塑性变形。如这时导线的芯线有损伤,哪怕是表面的损伤(特别不能有断股),在压接后它都会直接影响导线拉脱力指标的下降。芯线断一股拉脱力则会下降 5~10N(导线截面积为  $0.5\text{mm}^2$ 、 $0.8\text{mm}^2$  的类型)。导线拉脱力指标由压接型连接器厂家提供。所以在切割绝缘皮时,一定不能用刀片,应使用剥线钳(或热脱线器)。

当导线压接好后,应用目视法检查外观质量,看压痕的深浅及轴向有无变形,合格后再用送入工具将导线送入插头/座。在送入时要注意夹住导线的送入工具与插头/座的封严体端面尽量垂直向前推进,直到装配到位(到位后,有一个很小的手感声音),再放松导线,将送入工具单独拔出。使用时应避免斜插和使用蛮劲,否则会损坏工具和连接器。

当要取出导线时,要使用取出工具,将工具沿导线插入连接器的封严体内,注意保持取卸工具与插针/孔要垂直,到位后用拇指压住导线,连同取卸工具一起拔出。如是取空针/孔,取卸工具需要和顶出工具配合使用。压接钳应定期进行检查。这种检查对于使用者来说,就是对压接好的导线作定期的拉力试验,即一把压接钳每压 1 000 次后应对压接件作拉力试验,抽验件至少 3~5 件。

通过对压接件的验证,可知道压接工具是否处于良好状况,这是保证产品质量行之有效的手段之一。当选用压接型连接器时,对所使用的导线要有一定的要求。带丝包的导线不能用(如 ASTVR 系列)。目前用于压接型连接器上的导线有 SFF-50 系列、Raychem(瑞侃公司)55#系列、AF46-200 系列、ARS-100 系列等。

### (4) 压接型连接器的种类

- ① XKE 系列小型圆形耐环境、快速连接压接型电连接器。

这种连接器是按照 HB6112 设计的, 符合 MIL—C—26482 规范。该系列电连接器的特点是质量轻、体积小、接触偶密度高、连接分离速度快、密封性能好、品种齐全、可靠性高和具有三防性能(防盐雾、防霉菌、防湿热)。插头和插座连接为卡扣连接, 接触偶与电线的连接为压接端接, 接触偶可单个取出或送入。这种系列的电连接器, 在插头和插座可与 XK 系列插头和插座互配使用。

XKE 系列电连接器, 在 20 世纪 70 年代末就开始在飞机上使用, 它是国内第一个在飞机上全面使用的压接型电连接器。目前, 该系列电连接器有七种型别, 有非密封、密封和密封穿墙品种。尾部附件有直式压线支架、弯式压线支架、护线管、屏蔽等品种。该系列电连接器已广泛使用在航空、航天、兵器、电子工业等产品上, 接触偶接触电阻见表 16-5, 额定电流见表 16-6。

表 16-5 接触偶接触电阻

针孔规格 $f$ (mm)	1.0	1.5	2.0	3.0
非密封接触电阻 $R$ ( $\Omega$ )	$\leq 0.005$	$\leq 0.0025$	$\leq 0.0016$	$\leq 0.00075$
密封接触电阻 $R$ ( $\Omega$ )	$\leq (2.5 \sim 3.0) \times 0.005$	$\leq (2.5 \sim 3.0) \times 0.0025$	$\leq (2.5 \sim 3.0) \times 0.0016$	$\leq (2.5 \sim 3.0) \times 0.00075$
密封穿墙接触电阻 $R$ ( $\Omega$ )	$\leq 6 \times 0.005$	$\leq 6 \times 0.0025$	$\leq 6 \times 0.0016$	$\leq 6 \times 0.00075$

表 16-6 额定电流

针孔规格 $f$ (mm)							
1.0		1.5		2.0		3.0	
实际通电针孔数 (个)	允许电流 $I$ (A)	实际通电针孔数 (个)	允许电流 $I$ (A)	实际通电针孔数 (个)	允许电流 $I$ (A)	实际通电针孔数 (个)	允许电流 $I$ (A)
1~16	5	1~10	10	1~5	20	1~2	40
16~29	4.5	11~16	9	6~10	18	3~4	36
30~40	4	16~20	8			5~6	32
41~61	3.5	21~26	7				

环境性能指标如下:

环境温度:  $-55 \sim 165^{\circ}\text{C}$ 。

相对湿度: 温度  $40^{\circ}\text{C}$  时,  $95\% \sim 98\%$ 。

耐盐雾: 96h。

耐湿热: 温度  $40^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度  $95\% \sim 98\%$ , 时间 164h。

耐霉菌: 符合 HB6—77—83 第 3.9 条 2 级的规定。

工作高度:  $\leq 30\text{km}$ 。

机械性能指标如下:

机械寿命: 连接分离 500 次。

振动: 频率  $10 \sim 500\text{Hz}$ ; 加速度  $98\text{m/s}^2$ 。

冲击: 频率  $40 \sim 100$  次/min; 加速度  $98\text{m/s}^2$ 。

离心: 加速度  $245\text{m/s}^2$ 。

封严体: 硅橡胶。

电气性能指标如下:

工作电压: 海平面 500V; 25km, 250V; 30km, 200V。



XKE 压接型连接器型号命名如图 16-5 所示。

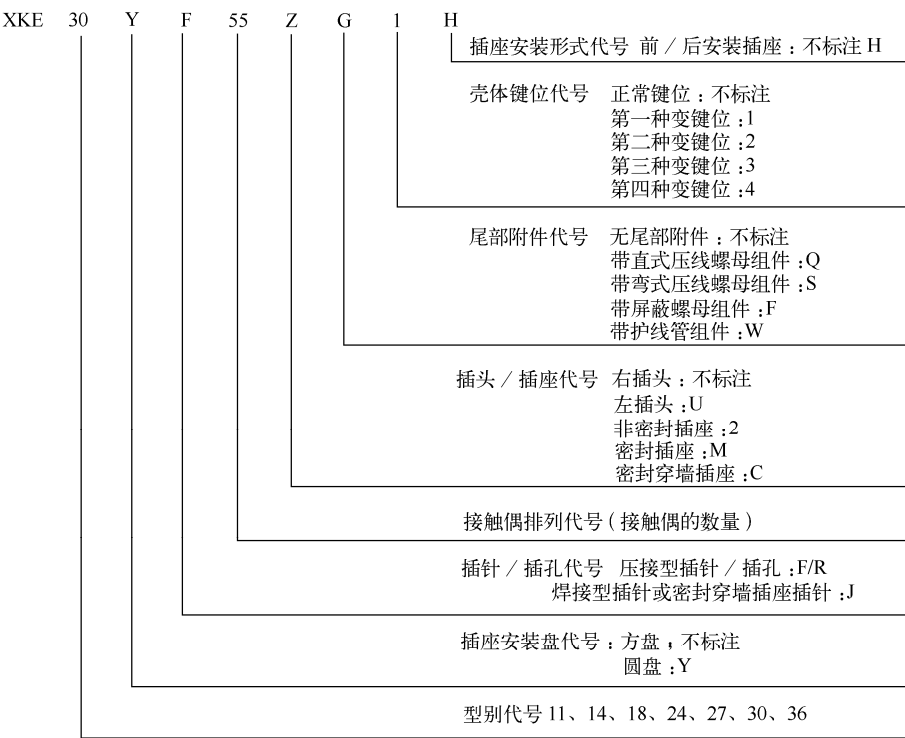


图 16-5 XKE 压接型连接器型号命名

② YB 系列 II 型高可靠圆压连接器

该连接器符合国军标 GJB598 中系列 II 的要求。其插头与插座的连接方式为卡口连接, 接触偶与导线的连接采用压接式, 它具有体积小、接点密度高、耐环境性能优良、电气性能优良、使用简单可靠等特点, 广泛用于飞机、飞船、卫星、军舰、军用雷达、通信、计算机、仪器仪表等领域。主要技术参数见表 16-7、表 16-8。

表 16-7 工作电流、接触电阻

接触件代号	插针配合 $f$ (mm)	导线截面积 $S$ (mm <sup>2</sup> )	与接触件适配 导线 (AWG)	导线外径 $D$ (mm)		工作电流 $I$ (A)	接触电阻电压降 $U$ (V)
				最小	最大		
20	1.0	0.20	24	1.02	2.11	3.0	45
		0.30	22			5.0	45
		0.50	20			7.5	55
16	1.6	0.50	20	1.35	2.62	7.5	45
		0.80	18			10.0	45
		1.25	16			13.0	50
12	2.4	2.00	16	2.46	4.01	16.0	45
		3.16	12			23.0	50

表 16-8 工作电压、试验电压

使用条件 $h$ (m)	工作电压 $U$ (V)		试验电压 $U$ (V)		绝缘电阻 $R$ (M $\Omega$ )	
	使用等级 I	使用等级 II	使用等级 I	使用等级 II		
海平面	600	1000	1600	2300	25℃	200℃
21336	300	450	375	500	≥5000	≥500

工作温度：-55~200℃（L 系列）；-55~200℃（W 系列）。

相对湿度：（65±5）℃时达（94±4）%。

随机振动：功谱密度 1.0；加速度均方根值 41.7，振动频率范围 10~2kHz。

冲击：加速度 2 940m/s<sup>2</sup>。

机械寿命：500 次。

### ③ YC 型圆形连接器。

符合 GJB599-93（MIL—C—38999），是短外壳卡口连接形式（系列 II）、螺纹连接形式（系列 III）、具有耐环境、结构紧凑、重量轻、接点密度高、接触可靠等特点。外壳镀镉或化学镀镍，接触件规格：10、20、22，镀金，接触件数目：5~55。工作电压：400V（交流），电流：3A、5A、10A。

### ④ YG 型复合材料圆形连接器。

符合 MIL—C—29600，有 A、B 两个系列。其主要性能有：耐腐蚀（盐雾试验 1000h）；抗电磁干扰；接触件镀金；接触件数目：27、38、56、61、92；工作电压：AC500V，工作电流：5A、7.5A、13A。

### ⑤ QS 系列圆形连接器。

卡口连接，采用双曲面线簧插孔接触件；金属外壳镀镉或导电氧化；接触偶直径 1.00~2.85mm 六种，镀金/银；接触偶数目 1~62；端接除压接外，也可焊接。工作电压 500V（交流），工作电流 3.5~40A。

### ⑥ JL 型圆形连接器。

该连接器是参照 MIL—C—5016 和 MIL—C—26482 设计的。接触偶直径有 1.6mm、2.4mm，镀金；接触偶数目：3~19。工作电压：600V、300V；工作电流：13A、5A。

以上这些压接型连接器的选用都要根据自己产品的需求及产品的使用环境和用户要求等情况综合考虑。这些圆形连接器都用于电子设备的机箱、机柜的多芯电缆连接上。另外，在矩形连接器方面（主要用于印制电路板上），近几年来也出现了不少压接型的。例如：6032-B、C、Q、R 连接器；CH 型、CS 型、CE 型等连接器；德驰公司的连接器、AMP 公司的连接器等。

#### （5）压接型连接器对导线的要求

所有压接型连接器的一个共同之处，是它们的接触偶都是可以从连接器中拿出来，或是插针或是插孔（视与之相配的头座情况而定），这些接触偶靠压接工具与导线实行连接。什么规格的导线（即导线的粗细），配多大孔径的接触偶，都有着非常严格的要求，否则会造成导线的过压（导线易断）或欠压（导线易拉出），使连接器在使用中存在隐患。因此，在使用压接型电连接器时，对针孔类型、针孔色环标记、针孔工作直径（规格），以及适配导线的截面等压接参数，一定要有明确的工艺文件规定；只有这样才能保证压接型连接器的使用质量。

压接型连接器的另一个共同要求，是它们所使用的导线都没有丝包层。如：AF-250 型系列、Ray-chem（瑞侃）公司航空电线 55 系列、ARS-100-500V 系列、AF46-200-250V 系列等高质量的压接导线。

对电路特性上有屏蔽考虑而选用的屏蔽导线也可实施压接，其要求如下：对屏蔽导线的芯线按常规要求压接，对屏蔽导线的屏蔽层，在离芯线较近的地方剥离出来，将它接续一根满足要求的短导线，再将这根短导线进行压接（注意：往往这个屏蔽层是需接地的，工艺上应考虑地通路）。对双绞线而言，在离电缆头较近的位置进行分离，然后进行压接，再送入各自相应的孔位里。

#### （6）压接工具的种类

压接型连接器因结构和使用要求的不同，它们的压接工具也有所不同。XKE 型系列连接器需

用压接工具的型号是：SYQ-001，可压导线截面积为  $0.1 \sim 1.5\text{mm}^2$ ；SYQ-002，可压导线截面积为  $0.5 \sim 6\text{mm}^2$ 。YB 型系列连接器需用压接工具的型号是：M22520/1-01，可压导线截面积为  $0.2 \sim 3\text{mm}^2$ ；M22520/2-01，可压导线截面积为  $0.08 \sim 0.5\text{mm}^2$ 。

另外，还有一些矩形连接器的压接工具；一些对导线进行转接（二根、三根导线转成一根）的压接工具。

## 16.1.2 整机联装接线技术

### 16.1.2.1 整机联装中的配线技术

电子设备的装配质量，在一定程序上是由布线和接线的工艺性所决定的。各种元器件安装完毕后，要用导线在它们之间按设计要求连接起来，完成整机电路。这些连接导线（包括印制导线）是用来传输信号和电能的。因此，应该正确地选用合适的导线。

#### 1. 导线的性能

电子设备常用的裸线，是指没有绝缘层的单股或多股铜线、镀锡铜线等。电磁线，是指有绝缘层的铜线，绝缘层由涂漆或包缠纤维构成。电线、电缆就是通常所说的安装线和安装电缆，一般由线芯、绝缘层和保护层组成，在结构上有硬型、软型、特软型之分。线芯有中芯、二芯、三芯及多芯等。通信电缆包括电信系统中各种射频电缆、电话线和广播线等。

#### 2. 导线的选用

##### （1）导线选用时应考虑的各种因素

选用导线时，要考虑的因素较多，并且各种因素之间存在一定的影响，如图 16-6 所示。

##### （2）导线截面的选择

选用导线，首先要考虑流过导线的电流，这个电流的大小，决定了导线的芯线截面的大小。但绝缘导线多用在有绝缘和耐热要求的场合，导线中允许的电流值将随环境温度的不同而异，因此，还应考虑电流密度的大小。

##### （3）导线颜色的选用

布线中使用不同颜色的导线，便于区分电路的性质和功能，以及减少接线的错误。如：红色表示正高压、正电路，黑色表示地线、零电位（对机壳）等。随着电子工业的发展，电子设备日趋复杂化、多功能化，有限的几种颜色不可能满足复杂电路布线的要求。因此，布线色别的功能含意就逐渐淡薄了。目前，除某些生产厂家还有具体规定外，配线色别主要目的是减少连线中的错误，便于正确装联、检查和维修。当导线或绝缘套管的颜色种类不能满足供应时，可用光谱相近的颜色代用，如常用的红、蓝、白、黄、绿色的代用色依次为粉红、天蓝、灰、橙、紫色。

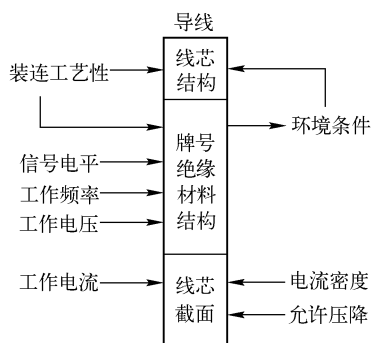


图 16-6 各种因素之间的影响

### 16.1.2.2 整机联装中的布线技术

布线，是指整机内电路之间、元器件之间的布局。布线的好坏必然对整机性能和可靠性产生一定的影响。现在国内大部分电子设备都采用印制电路技术和导线的锡焊连接相结合的布线方法。合理的布线、整齐的装配和可靠的焊接是保证整机质量和可靠性的几项主要措施。

### 1. 整机布线的基本原则

机箱的布线设计,是在机箱中各种电子零、部件之间进行电连接布线设计。它为生产提供工艺性设计文件,保证布线位置与结构的合理,实现整个机箱内元器件组合之间的电连接并达到机箱的电性能指标。

我们知道,将电子设备设置在车上、舰上、机上,这些设备的电源线、信号线、控制线、接地线等各种导线均靠在一起,从而构成了干扰波感应的因素。干扰波除了从高电平线路对低电平线路直接感应外,还可通过中电平线路相互耦合,在整个电子设备中所产生的场强是单个场源产生的场强的总和。机箱中单个场源不外乎是机箱中的导线和元器件。因此,对走线的精心设计是非常重要的,要尽可能排除各种干扰,合理有效地利用机箱内宝贵的空间(特别是机载产品)。应按导线传送的类型、频率、功率、分类捆扎线束,这样可防止线间串扰。此外,还应考虑设备的可靠性和维修性。布线设计在确立了上述主要因素外,还要从美学的角度尽量使布线均匀、美观。

### 2. 整机布线的设计要点

在布线设计中原则上应遵从以下要点:

(1) 应尽可能贴紧底板走,竖直方向的线应紧沿框架角或面板走,使其在结构上有依附性,也便于机械固定,对于必须架空通过的线束,要采用专用支架支撑固定,不能让线束在空中晃动。

(2) 线束穿过金属孔时,应率先在板孔内嵌装橡皮套或专用塑料嵌条,也可在穿孔部位包缠聚氯乙烯带。对屏蔽层外露的屏蔽导线,在穿过元件引线或跨接印制线路等场合时,应在屏蔽导线的局部或全部加套绝缘套管,以防发生短路。

(3) 处理地线时,为方便和改善电路的接地,一般考虑用公共地线(即地母线),常用较粗的单芯镀锡的铜线做地母线,用适当的接地焊片起到固定其位置的作用。地母线形状决定于电路各接点的实际需要,一般地母线均不构成封闭的回路。

(4) 线束内的导线应留 1~2 次重焊备用长度(约 20mm),连接到活动部位的导线,其长度要有一定的活动余量,以便能适应修理、活动和拆卸的需要。

(5) 为提高抗外磁场干扰能力以及减小长线回路对外界的干扰,常采用交叉扭绞布线。

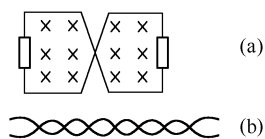


图 16-7 交叉扭绞布线

单个回路的布线在中间交叉,回路两半的面积要相等。在均匀磁场中,左右网孔所感生的电势相等、方向相反,使整个回路的感生电势为零如图 16-7(a)所示。在非均匀磁场中,对一个较长回路的两条线,给予多次的交叉(通称麻花线),则磁场在长线回路中的感生电势亦为零,如图 16-7(b)所示。

(6) 所有整机中的连线都应本着走短线、近距离的原则进行布线。

(7) 电源线、信号线、控制线、高电平线、低电平线要隔离;一些敏感性的导线,应远离电源、变压器和其他高功率组件布线束。

(8) 引信线与所有其他线隔离,双绞线、屏蔽线多点接地。

(9) 注意线束中由屏蔽导线与主地线间无意构成的地回路。

(10) 交流线束、直流线束要分开布置。

(11) 高频和前后沿小于 5ms 的脉冲信号线用多点接地,并应使用屏蔽导线。

(12) 隔离输入、输出信号线,即不要把它们放在同一把线束内。

(13) 线束不能靠近发热元器件放置。

(14) 音频低电平低阻抗输出线必须用屏蔽线,屏蔽体在接收端单点接地。

(15) 线束通过锐角或有可能划伤导线的地方时, 应将线束通过部分或对锐角处进行处理, 以保证线束的安全。

(16) 不能把高电平能量的同轴电缆和非屏蔽电缆或低电平信号屏蔽电缆放在同一个线束内。

(17) 音频高电平信号线用双绞线或屏蔽线, 在信号源端接地。

### 3. 电缆的固定方式

无论是哪种类型的机柜, 它都有走线槽或布线槽, 跟线架或摆线架装在机柜的侧面和层间, 用以铺设、固定电缆线束。有的机柜没有跟线架或摆线架, 走线槽和布线槽一般都在机柜的侧面, 将线束(没有做成单根电缆的导线)或装好的电缆布放在槽里, 操作上是边布放边用尼龙扎带固定, 同时要把去各层分机的电缆或线束甩出来, 再将其布放到跟线架或摆线架上, 将这些电缆和线束带固定在它们上面。甩出的长度要根据各分机上电缆座或要连接的去向具体确定。这里需注意的, 是这个甩出长度一定要考虑: 当分机抽出(像柜子中的抽屉一样)到最外时, 电缆或线束也要跟到最外, 这就是甩出的最大长度。留长了、短了都不行。

没有跟线架的机柜, 线束或电缆束从机柜的两个侧面走线槽内按各自分机去向分出来后, 就要将它们布放在各分机的层间隔板上, 这些甩出的电缆线束应用套管(常用的是氯磺化套管)将其甩出部分分别按机箱上的插座位置编排固定好后, 套上套管, 再用铝条分隔固定, 当各分机装上之后, 将各电缆头拧各分机的电缆座上, 这样, 这一排有序的电缆束就会随分机的拉出、送入而一起运动, 不会乱。

### 4. 结构设计不到位的布线处理

在整机装联中, 可能存在下述情况:

(1) 机箱内器件位置摆放不合理, 线束无法走, 或走不下 在实际生产中例子最多, 特别是机载产品, 其机箱内布线空间往往很小, 而导线大多用的是屏蔽导线, 线径增加了很多, 线束变粗了。导线的屏蔽皮要求就近接地, 布线每走一步都要考虑这些问题。而结构设计留的走线空间是不知道线束粗细的。对于机箱底部(特别是在面板上)布满插座, 并且插座间还有许多螺钉, 这种情况就意味着有效布线面积减少了; 因为线束布放在螺钉上, 整机在受到各种震动时容易损伤线束。处理这种情况有几种布线的方式:

① 把线束扎成矩形, 即往高处伸展(传统是圆形的)。

② 将传统的螺钉换成戴圆帽的(自制)。

③ 结构设计根据装配布线情况临时做一个放线支架, 如图 16-8 所示, 上面有一些条孔, 好穿孔扎线带。至于这个支线板竖放还是横放, 长、宽或其他形状就看布线本身的需要。使用时将板上的螺钉孔用螺柱支起来, 螺柱的高度根据需要而定。

④ 对设计用线(特别是粗导线)重新进行工艺性审查, 因为许多设计在用导线时不是精确计算电流, 而是“大概”的指导思想; 并且电流保险系数取得很大, 遇到这种“可生产性差”或“难以生产”的情况时, 导线的工艺性审查往往作用很大。

(2) 布好的线束无处上线卡(即无法固定线束) 处理方法一般有以下几种:

① 常规的处理方法是, 在需固定线束的地力, 视机箱内器件位置上固定螺钉的情况, 看是

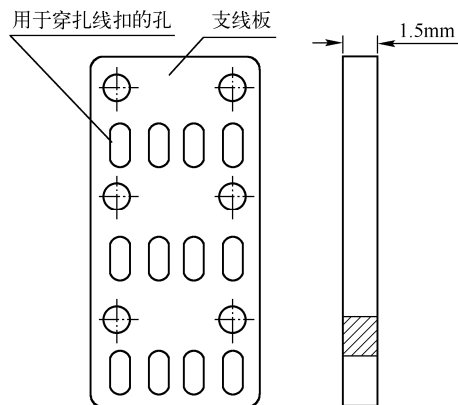


图 16-8 放线束的支架

否可以借用这些螺钉，在其上面放一个线卡；如没有的话，就要专门打一个固定线卡的孔，当然这样一来机箱的表面涂覆就被破坏了（视用户要求可加以修复）。

② 有时走线面积很小，或线束不是很粗无法使用金属线卡，这时可以剪一段有一定直径的套管（选择直径的粗细视线束的大小），将其剖开，在剖开重叠处剪一个小口，以能套进螺钉为准，把要固定的线束套上后就近固定在螺钉上。

③ 目前有不少的地方用胶来固定线束（线束不是太粗才可以），选择合适的线距，将胶点涂在线束的底部，注意，在实施点胶前一定要清洁点涂的位置。这也是一种固定线束的可行方法，但是这是一种化学的方法，随着时间的推移、环境的变化其可靠性有下降的可能。这种胶的型号为 GD-416，白色，不透明，室温固化需三天；还有一种胶为：GD-401，基本无色，透明，室温固化约占 4h。此种胶流淌比 GD-416 快，因而可浸入到线束的里面，胶体不明显，但在操作上要困难些，弄不好会漫流到不需要的地方，影响美观。

（3）前面板、后面板、侧板上的器件或插座与机箱底座上的插座或器件的连接导线，来回交叉连接，使操作者无法按常规要求布线 对这些不合理的来回交叉导线，在布线上要优先考虑电磁兼容问题，无论是否存在干扰，对这些来回交叉的导线都应单独布线，并且尽量布短线。对

这种不合理的设计，一定要转告设计者本人，以便在批次生产中逐步加以完善。

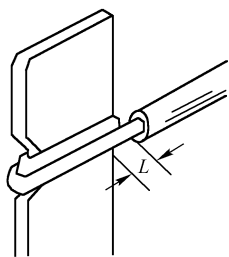


图 16-9 导线和端子的绕焊

### 16.1.2.3 整机中的导线焊接技术

#### 1. 导线焊接方式

导线同接线端子、导线同导线之间的连接有三种基本形式：

##### （1）绕焊

导线和接线端子的绕焊，是把经过镀锡的导线端头在接线端子上绕一圈，然后用钳子拉紧缠牢后进行焊接，如图 16-9 所示。在缠绕时，导线一定要紧贴端子表面，绝缘层不要接触端子。一般取  $L=1\sim 3\text{mm}$  为宜。

导线与导线的连接以绕焊为主，如图 16-10 所示。这种连接的可靠性最好，在要求可靠性高的地方常常采用。

操作步骤如下：

- ① 去掉导线端部一定长度的绝缘皮。
- ② 导线端头镀锡，并穿上合适的热缩套管。
- ③ 两条导线绞合，焊接。
- ④ 趁热把套管推到接头焊点上，用热风或用烙铁烘烤

热缩套管，套管冷却后应该固定并紧裹在接头上。

##### （2）钩焊

将导线弯成钩形钩在接线端子上，用钳子夹紧后再焊接，如图 16-11。其端头的处理方法与绕焊相同。这种方法的强度低于绕焊，但操作简便。

##### （3）搭焊

图 16-12 所示为搭焊，这种连接最方便，但强度及可靠性最差。图（a）是把经过镀锡的导线搭到接线端子上进行焊接，仅用在临时连接或不便于缠、钩的地方以及某些接插件上。对调试或维修中导线的临时连接，也可以采用如图（b）所示的搭接办法。这种搭焊连接不能用在正规产品中。



(a) 细导线绕到粗导线上



(b) 同样粗细的导线的绕焊

图 16-10 导线与导线的绕焊

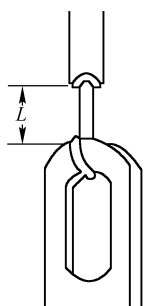
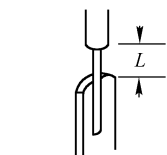
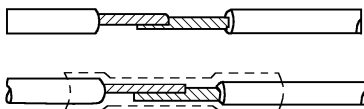


图 16-11 导线和端子的钩焊



(a) 导线和端子的搭焊



(b) 导线和导线的搭焊

图 16-12 搭焊

## 2. 导线和平板件的焊接

在金属板上焊接的关键是往板上镀锡，如图 16-13 所示。一般金属板的表面积大，吸热多而散热快，要用功率较大的烙铁。根据板的厚度和面积的不同，选用 50W 到 300W 的烙铁为宜。若板的厚度在 0.3mm 以下时，也可以用 20W 烙铁，只是要适当增加焊接时间。

对于紫铜、黄铜、镀锌板等材料，只要表面清洁干净，使用少量的焊剂，就可以镀上锡。如果要使焊点更可靠，可以先在焊区用力划出一些刀痕再镀锡。

因为铝板表面在焊接时很容易生成氧化层，且不能被焊锡浸润，采用一般方法很难镀上焊锡。但事实上，铝及其合金本身却是很容易“吃锡”的，镀锡的关键是破坏铝的氧化层。可先用刀刮干净待焊面并立即加上少量焊剂，然后用烙铁头适当用力在板上作圆周运动，同时将一部分焊锡熔化在待焊区。这样，靠烙铁头破坏氧化层并不断地将锡镀到铝板上。铝板镀上锡后，焊接就比较容易了。当然，也可以使用酸性助焊剂（如焊油），只是焊接后要及时清洗干净。

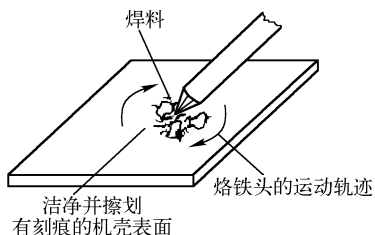


图 16-13 金属板表面的焊接

## 3. 常见导线端子及其焊接

在电子设备的整机或分机中，各种器件、零件、部件的焊接端其形状一般有下面几种：

### (1) 孔状的焊片形式

单向、孔状焊片的端子在操作上要求钩焊，并要求焊片的两面都“吃”焊料。钩好后导线的引出方向常规处理方法是顺着焊片，然后根据导线的去向再进行转向。

### (2) 无孔方柱或圆柱形的接线柱形式

如继电器、琴键开关、电位器、大功率晶体管、各种微波器件的引出端等。这种情况的端子在操作上要求采用绕焊（注：这里讲的绕焊不是用绕接工具进行的），并且至少要绕一圈或一圈半。在绕前要注意观察单根导线的摆放方向，一般是依线束的出线为基准来选择，另外也要视焊接端子的安装情况来选择。例如，安装在面板或侧板上的大功率晶体管引脚，用镊子或小尖嘴钳在引脚的侧下方方向上进行绕接。施焊前就要将导线的方向定好，否则焊后的导线形状很难看，且导线的弯曲应力不平衡，易造成故障隐患。又如，继电器（一些大的继电器除外）、微波器件的引出端，导线在其上绕好后的引出方向一般是在端子的延长方向。注意，线头不要预沾焊料，因为镀上焊料后，导线与端子的绕接紧密度会下降，所以对需绕接处理的导线，其端头剥出后无须预上焊料。

### (3) 有孔的接线柱形式、片状形式

如各种型号的 PCB 插座、空心铆钉、变压器的引出端、熔丝座等。在整机中，这种焊接形式最常见、最普遍，因为整机中离不开 PCB，它与整机的电连接完全由各种型号的插座来完成。

而这些插座多被安装在整机的底板上,其焊接端子多数是孔状焊片形式。如 CY25I 型,端子分 A、B 面;CY40I 型,端子的 A、B 面是连在一起的(也有不连的),多用于电源部分;CY2-3 型、ZJA 型都是分 A、B 面的;DDK 型是计算机的专用插座(方柱形端子,应是绕焊,有时也钩焊)等,这些端子的焊接都采用穿焊,导线剥出后预上焊料。对于大于  $0.2\text{mm}^2$  的导线,CY25I 型的插座孔就穿不过去了(有时有一两根用于电源传输的粗线),处理这种粗线( $0.35\text{mm}^2$ ,  $0.5\text{mm}^2$ )的方法为搭焊。这里需指出的是:装联中一般是不允许搭焊的,如遇焊接端只能搭焊,这种搭焊是有条件的。对于上面讲的这种情况,其搭焊条件是:焊前用工具将导线头折弯  $90^\circ$ ,线头长度略短于被焊端子长度,将导线靠在端子上,此时才施焊。

这种端子还有一种焊接情况,即插座的 A、B 面需连通,可用  $D0.8\text{mm}$ 、 $D0.6\text{mm}$  的裸镀银线穿焊,或弯成“U”形放在插座的 A、B 向之间再焊接。对于  $0.35\text{mm}^2$  以上导线 A、B 面的短连,往往是电源用线,因而它占用两、三个焊接端。处理这样的焊点,其工艺是剥出适当长度的线头(以连接 A、B 面长度为准),预上焊料、直接架在焊接端的中间,用焊料将这几个端子连通。这种方法在操作时要注意动作一定要快,焊料不能流到端子的底部,焊料量要掌握得当。

总结上述三种焊接端的情况,需特别提醒的是:在处理焊点时,千万不能使插座正面的簧片变形(由焊接面造成的),否则会严重影响 PCB 的电连接。因这种情况时有发生,主要是操作者往往只顾机箱的底部操作,忽视了它的正面作用。所以,严格遵循以上操作原则,对产品质量可提供保障。

#### (4) 圆柱形的杯状端形式

这种焊接端子大多是多芯电缆的座,用来整机与整机间的电气连通,它们在整机中一般是布放在侧板或四周。还有一种插座,如 DC-37P/S(P 是座,S 是头)、DD-50P、D-25P、PDS-180J-10801-26 等都是杯状端子,但它们不是用于电缆的连接,而是和(3)中的插座使用情况相同。在端子的形状上后者比老式的 X 型、Q 型、P 型电缆座在柱形上要短些。

这类接点一般尺寸较大,如果焊接时间不足,容易造成“冷焊”。这种焊件一般是和多股软线连接,焊前要对导线进行处理,先绞紧各股软线,然后镀锡,对杯形件也要进行处理。操作方法如图 16-14 所示。

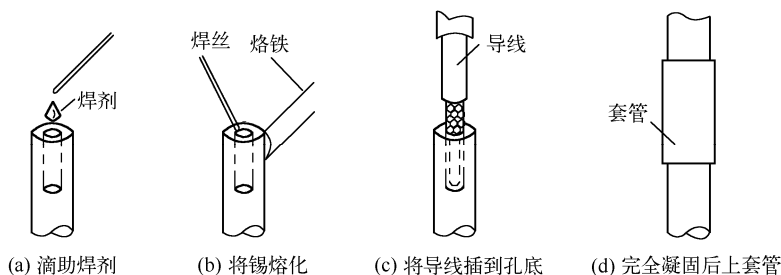


图 16-14 杯形接线柱焊接方法

- ① 往杯形孔内滴助焊剂。若孔较大,用脱脂棉蘸助焊剂在孔内均匀擦一层。
- ② 用烙铁加热并将锡熔化,靠浸润作用流满内孔。
- ③ 将导线垂直插入到孔的底部,移开烙铁并保持到凝固。在凝固前,导线切不可移动,以保证焊点质量。

- ④ 完全凝固后立即套上套管。

由于这类焊点一般外形较大、散热较快,所以在焊接时应选用功率较大的电烙铁。



#### 16.1.2.4 低频电缆制作工艺流程

低频电缆就是装联中常说的多芯电缆。低频电缆主要用于电子设备的单元与单元、分机与分机、分机与机柜、机柜与机柜之间的电气连接,可工作在户内、户外、地上、地下、沿海、高湿区、设备的高温区等不同环境。对它的选用,要根据使用或用户要求及工作环境进行考虑。

低频电缆常用的焊接型有 P 型、Q 型、X 型、XK 系列型等,常用的压接型有 XKE 型、YB 型、YC 型、YG 型、OX 型、JL 型等。无论是焊接型还是压接型的低频电缆,其制作工艺如图 16-15 所示。

这里需注意的是焊接型的低频电缆,其焊接端子大多都是杯状端,在装联中对这种端子的焊接要求是:一定要插到杯底焊接。

#### 16.1.2.5 电缆护套装联技术

##### 1. 电缆护套的种类和选用

由于低频电缆都是多根导线组成的线束,这种线束往往有一定的长度,如何将这长线束构成一根电缆?在装联中,可以用尼龙扎带间隔一定距离进行绑扎;也可以用人们编辫子的方式进行编扎;还有一种办法是用绝缘套管剪成 10~20mm 长的管,进行绑套(注:此种办法一般限于芯线数不多,且套管要稍紧套线束);更多的是选用电缆护套进行线束的穿套。目前在装联中常用的护套有聚氯乙烯套管,即 PVC 套管,这种套管常温时不柔软,低温时较硬,不易穿套长于 1m 的电缆。

防雨布套管是在布材质上涂了一层胶,较柔软,穿套电缆线束时,可以打皱或拉直。防波套管是一种用得最多、最广泛的套管,它由铜镀铅锡合金的细丝编织而成。由于采用的是编织法,所以它有一定的伸缩性,凭借一伸一缩将电缆线束套进后走动,穿套线束非常方便,快捷。使用它还有一种好处,可以防止电磁波的泄漏与干扰电磁波的进入。

氯磺化聚乙烯套管耐臭氧、耐气候老化,并且具有优良的耐油、耐化学介质和机械性能。因此,氯磺化聚乙烯套管应用广泛,可用于电线电缆包覆层、电缆绝缘层、胶管、胶带、汽车零部件、建筑防水卷材、罐槽衬里、胶板、防腐涂料等。它是多种电线电缆的理想材料,比丁橡胶具有更好的耐热性能。用氯磺化聚乙烯套管做护套的电缆能满足 IEEE 标准,已被用于核电站中。但穿套长的电缆线束还是较麻烦,因它不像防波套、防雨布套那样,能一伸一缩地进行穿套。另外,热缩套管也可用来套低频电缆。

锦纶丝线编制的军绿色套管常常用在单机的布线线束中,航天设备中用此材料较多,当然它也可用来套低频电缆。这种材料具有防静电特性。

##### 2. 低频电缆护套端口的处理

无论采用什么类型的套管,在穿完护套时都要对其端口进行处理。目前常规处理有以下几种方法。

(1) 穿套到位后用 3# 黑色棉线将末端紧密缠绕,缠绕宽度在 10~20cm,再用 Q98-1 透明油

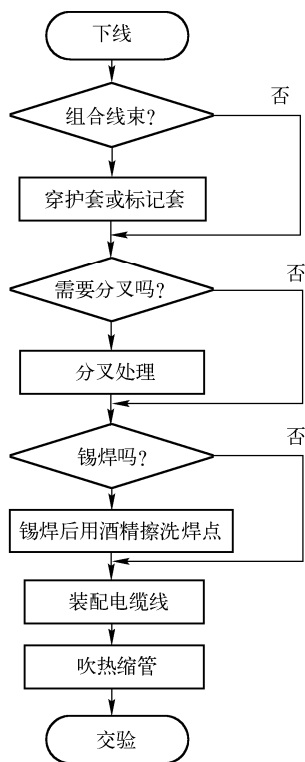


图 16-15 低频电缆制作工艺流程图

(一种快干蜡克漆)在线宽部分进行涂抹。

(2) 穿套到位后用白色锦纶线将末端紧密缠绕即可,不涂任何胶,因为使用这种方法往往在其外还要套热缩管保护电缆头。

(3) 对使用热收缩管进行整根穿套的电缆,就必须使用热风枪对其进行热收缩,长的电缆常常要用两把热风枪同时加热。下面介绍一种省力、省时,又保证质量的再流炉加工方法。使用的再流炉型号是:QUAD-ZCR-412B(桌面型四温区),热缩参数是:180℃→190℃→200℃→210℃,36cm/min。将整根套有热缩管的电缆展开,3~4根同时从头到尾徐徐送进炉中,进入时尽量靠在离人身体这边。

(4) 对使用防波套穿套的低频电缆,其末端进行处理方式有下述几种。

① 电缆头本身带有屏蔽套的(如XK型的屏蔽连接器)是最好操作的,将屏蔽套的外套套入防波套外末端下一点,再顺势往上推到位(即末端位)时,将屏蔽套的内套放入防波套的内面,这样象一个夹层一样把防波套夹在了屏蔽套的中间,然后在屏蔽套的端口(它有一翻边)修剪齐防波套的毛边,这时可进行焊接。焊好后再用小锉刀修整,最后用酒精擦洗焊接部位。

② 用自制的接地环焊接防波套末端,在操作上没有屏蔽套易操作,焊接前要注意将防波套的口撑到与接地环的口径一样大小才能施焊,焊后同样要求用小锉刀修锉接地环口的流锡,用酒精擦洗干净焊接部位。

③ 不用焊锡的一种方法,是把防波套末端推至连接器后附件的适当位置,将其往后翻卷用手压紧(以线束为轴),再用锦纶绑扎线密缠绕(也可用3#黑棉线),缠绕长度要以盖过翻卷后的防波套毛边为准。这种方法一般还要在电缆头及尾部一段距离加套热缩管或标记套管,这样可包住处理后的防波套末端(也有用胶带进行缠绕的)。

④ 一种新型处理防波套的办法,即在电缆连接器后附件的尾部(YB系列型)有一道凹槽,从防波套末端套上一个钛镍环,将处理平整的防波套推到连接器的这个凹槽上端,即推到后附件的尾部,要注意防波套的末端必须尽量保持原始的编织状态,如不能保持,可将零乱部分剪去,再将整齐部分往上推。这时把套上的钛镍环滑推至后附件的尾部凹槽上,可用手指的感觉来判断推到位否,一定要保证这个环放置位置的正确性,否则会影响防波套的接地电阻值。确认好位置后,用专用电阻加热器RH-3695-1/MOND105A 12对钛镍环进行加热,加热工具只能夹在环上,并确保看到温度色标,注意不要加热这个色标,加热夹具也不能接触防波套,否则会发生短路。对环进行加热,当温度色标由红(或兰)变深时,停止加热。这样防波套的末端就处理好了,这是一种能保证质量、操作方便的方法。

钛镍环主要用于连接器屏蔽后附件与电缆线束上防波套的连接固定,通常它与后附件一起包装。这是用特殊金属材料、特殊加工工艺制成的,当加热时它会收缩,产生6%~7%的径向收缩,从而实现防波套与连接器后附件的紧密连接。由于它受热后会收缩,因此安装前的储藏温度必须低于50℃。

#### 16.1.2.6 低频电缆分叉部位的处理

由于低频电缆是连接和传输各独立电路单元或独立分机的电信号,它面临着各种电路结构形式。因此,在装联中也就产生了各种装接形式,其中有一头对一头的电缆,有一对多头的电缆,对后者有一个分叉的问题。这种电缆在装联中一般称为低频分叉电缆,无论电缆分多少叉或分叉形式如何,对这些分叉的处理都有下面几种处理方法。

##### (1) 分叉处线束的处理

根据线束在多芯电缆内的去向关系,将准备好的导线在装配台上进行布放,先把各线束的去向理顺,尽量不要来回交叉。这里要提醒一点的是:作分叉电缆的准备工作时,同

样长度要求的导线，分叉电缆比直通电缆在下线时要多放一些余量，特别是那些从分支到分支去向的导线，如图 16-16 中 4 头、5 头的导线。

因这种导线在分支处受护套端口处理的影响，它要在端口先进去一些，再折出来才能到另一个分支去。因而对这种特性的导线就不能按设计给出的尺寸进行下线，否则会短，必然造成返工。

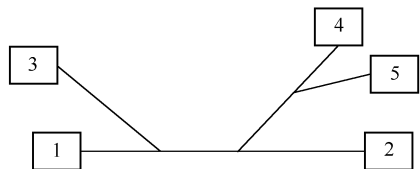


图 16-16 5 个头的分叉电缆示意图

将理顺好的分叉线束用扎线带或锦纶绑线预先大

致扎一下，根据电缆线束的粗细选用适合的护套（或按设计图纸要求）备用。穿套时要采取分段穿套，分段穿套有一个先后问题，如何掌握穿套次序应根据分叉电缆的分支情况、线束的粗细情况来决定。一般是先穿套长分支的线束、细分支的线束；后穿套短分支的线束、粗分支的线束。

### （2）分叉处护套端头的处理

对分叉电缆的护套进行处理时，要考虑到还有一个分支的护套端口要在同一个断面进行处理，这时对各分支线束的导线要理顺。这两个分支处理好后，在它们的外面还有一个包住这两个分支的大端口需处理，如图 16-16 的 4、5 头分叉与分支处；1、3 头分叉与主分支处；2 头与 4、5 头合拢处与主分支处等三个分叉的集中处。另外，还要注意当多个分叉口需处理时，都在同一断面地方进行处理，会造成电缆分叉在很短长度上有“大突包”，这个“大突包”会在电缆上机柜/架、上机箱/单机时造成妨害。所以，处理时要采取在主干或分支的适当位置上错开断面的做法加以处理，这样这个“包”就没有了“鼓”的感觉，也不会影响装机甚至造成返工。对这些问题的处理，作为工艺师在制造前应按低频电缆的使用情况、装机位置等加以考虑，给操作者在工艺文件上进行标注或说明。

### （3）分叉的焊接处理

对采用防波套做电缆护套的低频电缆，其分叉在焊接工艺上与前面所提到的防波套端口处理方法是一样的，分叉只是多个单端口的合拢，不过是中包小、大包中而已。（“中”和“大”的焊接长度要把握好）。但是在焊接这些三端口的防波套时，千万注意不要把芯线烫伤（因在操作时是看不到里面的芯线的），特别是焊接不耐高温的导线（如 ASTVR 系列导线）。但同时也要要求焊锡量的吃透与整个电缆护套周界的锡料保证；焊后立即对焊点进行手工清洗。

### （4）分叉热收缩套管的使用

随着热收缩产品的广泛开发和使用，很多地方将它用在低频电缆的制作中。在分叉电缆的分叉处，有的制造工厂用了称为“裤叉”的热收缩套管，对电缆分叉部位进行处理。这种分叉的热收缩套管也叫“魔缩管”，具有较大热缩比的是美国 Raychen 公司的热缩套管，热缩后管壁较薄，且不发硬，最大热缩比可达 4 倍。分叉热缩管的式样如图 16-17 所示。

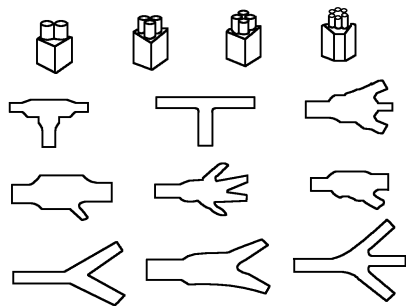


图 16-17 分叉热收缩套管的种类示意图

分叉的热收缩套管一般使用在电缆线束较细的场合，直接将芯线束加以分叉穿套，然后进行热风吹缩。

对芯数不多、又要分叉的电缆的制作，采用这种材质和方法其可靠性较高，也方便操作。

总之，对低频分叉电缆的装配和焊接，要因产品的芯线规格不同（带屏蔽的导线还要考虑屏蔽皮的处理）、电缆护套的不同、分叉的多少、电缆的长短、使用场合（即用户要求）等因素加以综合考虑，才能做出好看、经济耐用的产品。

### 16.1.2.7 扎线工艺

电子设备的电气连接主要是依靠各种规格的导线实现的,但机内布线纵横交错、长短不一,若不进行整理,不仅影响美观和多占空间,而且还会妨碍电子设备的检查、测试和维修。因此在整机组装中,根据设备的结构和安全、技术要求,用各种方法,预先将相同走向的导线绑扎成一定形状的导线束(也称线扎),固定在机内,这样可以使布线整洁,提高设备的商品价值。

#### 1. 扎线图的表示

线扎图是实际扎线的样板,一般宜采用 1:1 比例绘制,图形尺寸应符合线扎的实际尺寸,以便在图纸上直接排成。线扎图大都采用在同一平面上线扎的图形表示,若主干和分支向上或向下折弯,可用图 16-18 所示的符号和如图 16-19 所示的“A 向”视图一起表示。图 16-18 中:(a)表示向上折弯 90°;(b)表示向下折弯 90°;(c)表示同时向上、向下折弯 90°。

主干折弯为其他角度时,可用剖面符号及“A 向”视图表示,如图 16-20 所示。

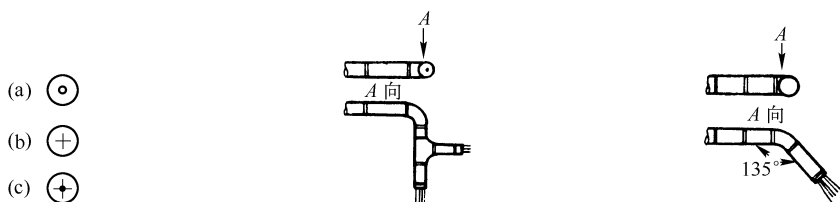


图 16-18 线扎图的符号 图 16-19 同一平面上线扎的图形表示 图 16-20 弯成其他角度的线扎图画法

线扎实例如图 16-21 所示。图上要标明实际尺寸,同时还要标出每根线的编号和起、讫点,并注出其加工的特殊要求。

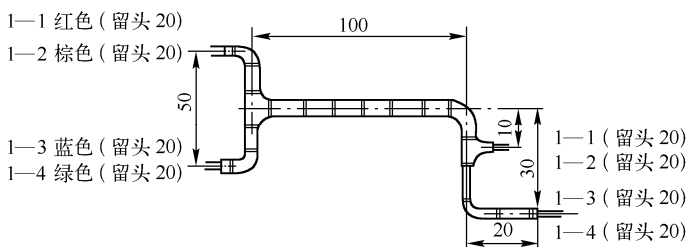


图 16-21 线扎图实例

#### 2. 线束绑扎的技术要求

- (1) 导线束的尺寸、形状符合设计和工艺文件的要求。
- (2) 导线束的弯曲半径要比导线束直径大两倍以上。
- (3) 导线束绑扎间距均匀,主干平直。
- (4) 导线束分支应从主干线的侧下方抽出,扎线结扣配置在下面,以保持导线束表面整齐、美观。
- (5) 导线在导线束内的布放一般为屏蔽导线在下面,粗导线在两侧,长线在上面,短导线在中间。

(6) 较多的导线绑扎时应有备份导线,备份量为总根数的 3% 左右。备份导线的长度等于导线束中最长的导线,线径为最粗的线径。

#### 3. 线束的制作工艺

- (1) 线束中导线长度的确定和排列原则

线束中导线的长度应考虑合理的转折、焊接余量和两端焊接时所需的剥线长度。这里合理的转折是指抽出线束的引出线在焊接后不应绷得太紧，并要有一定弧度和弯曲长度。焊接余量是指导线重新焊接应留下的剥线余量。对大型线束来说，必须考虑 1~2 次的重焊余量，一般在 10~16mm 左右，通常在引出线长度内考虑进去。

### (2) 绑扎工艺过程

① 导线下料。导线应按工艺排线表规定的长度下料，并根据导线束的直径和拐弯次数的多少，增加适当的余量。

② 绑扎。一般从导线比较集中的一端开始绑扎，按工艺排线表的顺序，将每根导线续入或放出。因此，要求排线表正确无误，每根导线续入或放出的位置正确。否则一根导线的差错会造成整把导线返工。

### (3) 导线的捆扎工艺

① 线绳绑扎。绑扎线绳常用棉线、亚麻线、尼龙线。图 16-22 所示为两种起始锁紧结的打法。

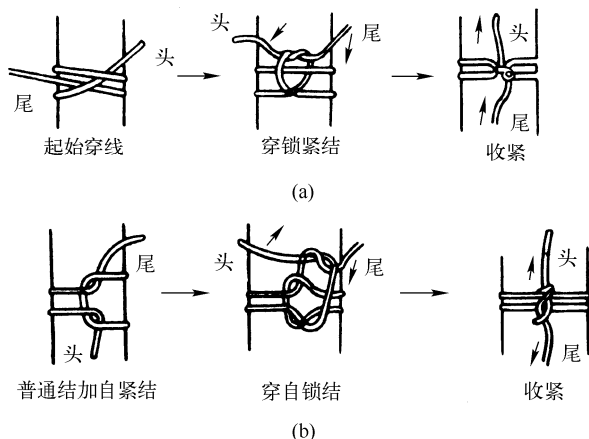


图 16-22 两种起始锁紧结的打法（绑扎两圈）

中间线扣的结法（连续打结）见图 16-23，图（a）所示为一圈自紧结和自锁结，图（b）为二圈的自紧结。

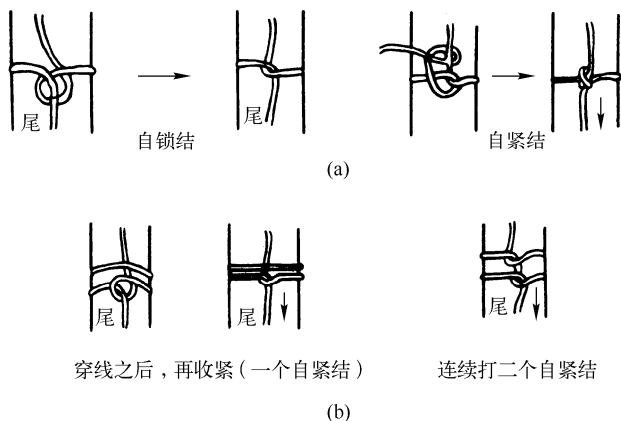


图 16-23 自紧结和自锁结

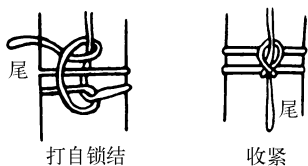


图 16-24 末端线扣的结法

末端线扣的结法如图 16-24 所示。

② 线束绑扎。在线束的头、尾部要打两圈以上的自锁结、扣死。当线束直径大于 16mm 时,应采用双线捆扎,十字分叉处允许分支线束打一个起始结。扎线除了要注意扎结的间隔外,还应注意扎结的牢度;为了防止松散,线结不能打歪,不能把线扎捆成椭圆形状。

③ 线扣绑扎。线扣绑扎工艺基本上与线绳绑扎工艺相似,不同的只是用线扣代替线绳。用线扣绑扎可以提高绑扎速度,机器维修时,拆装也比较方便。线扣有多种样式,主要利用倒齿对收紧带起作用,拉紧时是顺齿方向容易通过。绑扎时可用手或专用工具把线拉紧,但松紧要适宜。适当拉紧后,剪去多余的长度,如图 16-25 所示。

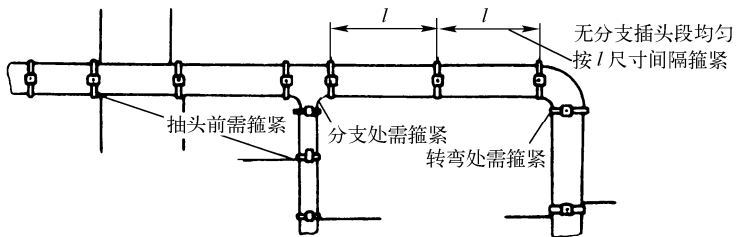


图 16-25 线扣绑扎

④ 胶粘工艺。除了用以上方法绑扎线束外,还可采用胶粘的方法来制作线束。工艺过程简便,一般用有机溶剂把塑料导线黏合在一起,可省去扎线过程中的诸多工序。在做法上,通常根据线扎图,做好粘线的模板(常用有机玻璃)。同一线扎的导线最好用不同的颜色,如果导线数多,可分层粘合,每层导线的粗细要尽量一样,否则第二层不容易粘,层数在原则上不超过三层,每层导线根数以不超过四根为宜,多了容易散开,而且出线不方便。由于溶液容易挥发,涂抹要迅速,大约半分钟即可胶粘住。粘好的线扎,有时需要在末端套上适当的塑料管,以防在分线焊接时,使整股线扎裂开,如图 16-26 所示。

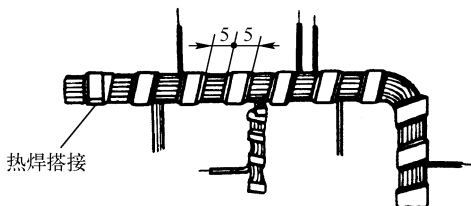


图 16-26 用胶粘的方法来制作线束

## 16.2 输配电开关柜装配技术

### 16.2.1 一次母线设计与制造

#### 16.2.1.1 概述

输送电能的主回路连接线叫一次线。开关柜的一次线连接,就是指开关柜中输送电能的高低电压器间的主回路连接。连接开关柜一次线的导电材料,常见的有矩形铜排、铝排或铜编织线,也有钢板或其他铜、铝材料的导线。为了便于区分,习惯上凡是用裸露的、没有外绝缘包层的导电材料,如铜排、铝排、钢板等连成的一次线,叫做母线。母线又有主母线和分支母线的区别。它们一般通过的电流都较大,要求能承受一定动稳定与热稳定电流。而矩形母线与其他形式的母

线相比，不但散热面大，节省材料，而且便于安装。用一般导线连成的主回路连线，习惯上就叫它一次线，它们通过的电流都较小，如一般的铜、铝塑胶绝缘导线等。

1. 母线材料

母线材料有铜、铝、钢三种。铜的电阻率小，机械强度大，在空气中氧化得很慢，对酸和碱的抗腐蚀性比较强，但价格较贵。铝的电阻率高于铜，机械强度比较小，在空气中，其表面非常容易氧化，对酸和碱的抗腐蚀性弱，但价格低，质轻而软，易于加工。

钢的电阻率比铝大，抗腐蚀性差。因为钢是磁性金属，在交流电路中产生磁化现象且涡流损失很大，因而钢母线的电压降也比较大。钢的最大优点是机械强度特别大，价格低，多用在接地线上。

虽然铜母线比铝母线性能好，但铜是贵重金属，是许多重要工业尤其是国防工业上必不可少的材料。因此在开关柜中，除特殊情况外，大多数采用的是铝母线。

2. 对母线的基本要求

(1) 母线表面及加工要求

母线材料表面应光洁、平整，不得有裂纹及夹杂物等。母线落料、钻孔或冲孔后的毛刺均需加工整平，母线表面不得有锤痕、划痕。母线弯曲后不应有裂纹或裂口。

(2) 母线表面涂漆

母线表面涂漆，且油漆应涂均匀，黏合牢固，不应有油漆起层、皱皮、流漆等缺陷。母线涂漆的作用：防止母线生锈或被氧化腐蚀；提高母线表面的热辐射系数，以改善母线的散热条件；便于识别母线的相序；使母线装置更为明显，增加母线的美观，引起人们注意，以防止触电。

母线涂漆的颜色要求，见表 16-9。安装位置按机柜的正视方向。另外，母线在螺栓连接处及支持连接处、线与电器连接处以及距所有连接处 10mm 以内的地方不应涂漆。

表 16-9 导线的相序及颜色

组 别	符 号	涂漆颜色或绝缘导线颜色	母线安装相互位置		
			垂直布置	前后布置	水平布置
A 相	U	黄	上	后	左
B 相	V	绿	中	中	中
C 相	W	红	下	前	右
正极	L+	棕	上	后	左
负极	L-	蓝	下	前	右
中性极	N	淡蓝	最下	最前	最右
安全用接地线	保护接地 PE	黄绿双色			
	E				
内部布线		黑色			
半导体电路		白色			

(3) 母线的排列顺序（见表 16-9）

(4) 母线与母线之间的间隙，母线与柜体及支持绝缘子的漏电距离（包括裸露的导体）要求：低压开关柜电气间隙不小于 10mm，漏电极距离不小于 12mm（抽屉式开关柜除外）。高压开关柜母线电气间隙要求见表 16-10。

(5) 母线的连接要求

① 开关柜中，母线一般采取贯穿螺栓

搭接，母线连接应严密，接触良好，配置整齐、美观，不同金属母线或母线与电器端子连接时，在结构上应采用防止电化腐蚀的措施，并保证铝母线连接受压后不致变形。

表 16-10 母线的电气间隙要求

额定电压 (kV)	3	6	10
不同相母排之间及至接地骨架的间隙 (mm)	75	100	100
母排至金属封板或金属门的间隙 (mm)	105	100	165
母线至正面网状封板或网状门间隙 (mm)	165	200	225

② 母线连接用的紧固件应采用符合国家标准的镀锌螺栓、螺母和垫圈。

③ 母线平置时，贯穿螺栓应由下向上穿，在其余情况下，母线置于维护侧。螺栓的长度在压平弹簧圈后露出螺母 2~3 扣为宜。螺栓的两侧都要有平垫圈，相邻螺栓的垫圈应有 3mm 以上的净距，以防止构成磁路发热，螺母侧要加弹簧垫圈。

④ 母线接触面连接应紧密，用 0.05mm×10mm 塞尺检查：母线的宽度在 63mm 以上者，不得塞入 6mm；母线宽度在 56mm 及以下者，不得塞入 4mm。

⑤ 母线与螺杆端子连接时，母线的孔径不应大于螺杆直径 1mm。丝扣的氧化膜应除净。螺母与母线间应加铜质搪锡平垫圈，但不应加弹簧垫圈。

⑥ 需要两片以上的矩形母线并联时，其并联母线间应保证与厚度相同的间隙，以便散热。

⑦ 母线固定装置应无显著的棱角，以防尖端放电。

(6) 母线防蚀

母线在运行中产生两种腐蚀，即化学腐蚀和电化学腐蚀。化学腐蚀是由于母线周围介质中的氧，会与表面和接触点附近金属起化学作用，形成金属氧化物，使连接处接触电阻增加，温升增高。解决办法：一般是在清除接触面氧化物后搪锡，或涂以导电膏或复合脂，再进行搭接。搭接之后，涂凡士林油可以阻止氧和空气中的水分进入搭接面，即能防止化学腐蚀。

电化学腐蚀是由于两种不同金属各具有不同的金属电位，它们构成电接触时形成电池式的化学腐蚀。如铜、铝母线相连接，铝是一种原子结构较活泼的金属，铜相对于铝是原子结构不太活泼的金属，这种活泼性不同的金属接触后，由于空气中的水及二氧化碳的作用而产生化学反应，铝失去电子而成负极，铜不易失去电子而成正极，这样就形成了电化学腐蚀，使接触电阻增大，结果温升增高，氧分子活动能力增强，又加速了腐蚀；腐蚀严重，温升更高，形成恶性循环，连接处甚至发热烧毁。防电化学腐蚀的措施：减小两种不同金属的电位差。因此，母线与母线，母线与分支线及电器端子连接时，其连接处的防电化学腐蚀处理应符合下列规定。

① 铜-铜，在干燥的室内可直接连接；室外，高温且潮湿的或对母线有腐蚀性气体的室内必须搪锡。

② 铝-铝，在任何情况下可直接连接，有条件时宜搪锡。

③ 钢-钢，在任何情况下必须搪锡或镀锌。

④ 铜-铝，铜应搪锡或铜、铝都搪锡。

⑤ 钢-铜或铝，在任何情况下钢搭接面必须搪锡。对不便实施搪锡部分的搭接处，可用导电膏代替。

(7) 母线连接处的温升要求

对开关柜母线之间及分支母线与电器端子连接处的温升要求，不得高于表 16-11 的规定。

表 16-11 母线连接处的温升要求

母 线 类 别	最高允许温度	周围介质温度+40℃时允许温升
铜-铜	85℃	40℃
铜搪锡-铜搪锡	100℃	60℃
铜镀银-铜镀银	120℃	80℃
铝搪锡-铝搪锡	95℃	55℃
铜搪锡-铝搪锡	95℃	55℃
铝-铝	70℃	30℃
母线本体	70℃	30℃



16.2.1.2 母线的选取

1. 按长期允许发热条件选择

开关柜的母线截面，通常是按开关正常工作时的最大长期负载电流进行选择，也就是按母线正常工作时允许的最高发热温度来选择。母线选择后，还应校验在最严重的短路情况下，母线通过短路电流的发热（热稳定）和机械强度（动稳定）是否符合要求。这种选择方式必须满足的条件：在正常运行中，任何负载电流，长期通过母线时的发热温度，不应超过母线的最高允许发热温度。因此，所选取的母线额定工作电流必须大于或等于长期负载电流。

母线的选取与母线的排列形式有关，一般常用的排列形式有两种：立放和平放。母线立放时，散热条件比平放好，但母线平放时其水平方向的抗弯强度较立放大。因此，立放多用于高压开关柜母线，平放多用于低压开关柜母线。当选用的矩形母线截面大于  $1\ 200\text{mm}^2$  时，一般采用两条母线并联。但要注意，两条并联的母线电流，并不等于两个单条母线的电流之和，这是因为同一相双根母线靠得很近，间距较小，散热条件不好。另外，交流电通过母线时，会产生邻近效应（两根母线挨近，通过交流电后，其中一根线由于邻近母线的磁电效应，电流分布会不均匀，这种现象叫邻近效应），邻近效应使交流有效电阻增加，发热加剧，这就需要降低原单根母线的额定电流。表 16-12 列出了矩形母线的规格，表中的母线长期允许电流是母线竖装、环境温度为  $25^\circ\text{C}$ 、母线最高允许温度为  $70^\circ\text{C}$  的条件决定的；当环境温度不为  $25^\circ\text{C}$  时，应乘以温度校正系数  $K$ ， $K$  值见表 16-13。当母线平放时，宽度为  $60\text{mm}$  及以下的母线允许电流降低  $5\%$ ，宽度大于  $60\text{mm}$  的则降低  $8\%$ 。

表 16-12 扁铜、扁铝、扁钢的长期允许电流（分子为交流，分母为直流）

规格 (mm)	重量 (kg/m)		铜		铝		钢		
	铜	铝	允许电流 (A)		允许电流 (A)		规格 (mm)	重量 (kg/m)	允许电 流 (A)
			每极或每相片数		每极或每相片数				
			1	2	1	2			
16×3	0.4	0.12	210	~	165	~	20×3	0.47	65/100
20×3	0.53	0.10	275	~	216	~	25×3	0.59	80/120
25×3	0.67	0.2	340	~	265	~	30×3	0.71	95/160
30×4	1.07	0.32	473	~	365/370	~	40×3	0.04	125/190
40×4	1.42	0.43	625	/1000	480	/855	50×3	1.10	165/230
40×5	1.78	0.54	700/705	/1250	540/545	/965	60×3	1.41	185/280
50×5	2.22	0.63	360/870	/1625	665/670	/1180	80×3	1.88	245/365
50×6	2.67	0.81	955/760	/1600	740/745	/1016	100×3	2.1	305/460
60×6	3.2	0.97	1125/1165	1640/1990	870/880	1050/1655	100×3	0.63	70/116
80×6	4.27	1.3	1680/1610	2110/2630	1160/1160	1630/2055	20×4	0.79	85/160
100×6	5.34	1.62	1810/1875	2470/3245	1625/1655	1935/2516	25×4	0.94	100/165
60×8	5.27	1.3	1020/1045	2160/2485	1025/1040	1080/1840	30×4	1.26	100/220
80×8	5.7	1.73	1690/1655	2620/3095	1020/1055	2040/2400	40×4	1.57	165/270
100×8	7.12	2.16	2080/2180	3060/3810	1625/1690	2390/2945	50×4	1.88	195/325
120×8	8.53	2.59	2400/2600	3400/4400	1900/2040	2650/3350	60×4	2.51	260/425
60×10	5.34	1.62	1675/1625	2560/2725	1165/1180	2610/2110	80×4	3.16	320/530
80×10	7.12	2.16	1900/1990	3100/3510	1680/1640	2410/2785	100×4		
80×10	8.9	2.7	2310/2470	3610/4325	1820/1910	2860/3500			
120×10	10.7	3.24	2650/2950	4100/5000	2070/2300	3200/3900			

表 16-13 环境温度校正系数  $K$  值表

环境温度 ( $^\circ\text{C}$ )	-5	0	5	10	16	20	25	30	35	40	45	50
校正系数 $K$	1.29	1.24	1.2	1.16	1.11	1.05	1	0.94	0.88	0.81	0.74	0.67

在开关柜内，往往同一条主回路里连接的电器组件其额定电流值不尽相同，而开关柜在运行中，实际通过的电流往往小于或等于主回路电器的额定电流值。那么应以哪个电器的额定电流值

为准来选取母线的截面积呢？一般来说，长期最大负载电流是由该开关柜具有过载保护功能的电器确定的，超过这个电流值到一定的时间，保护装置就会切断电源，以此电流值确定的母线截面，其温升也就不会超过规定值。具体选取原则如下：

(1) 对于高压开关柜，应以电流互感器的一次侧电流额定值为准。因为电流互感器的二次回路连接着继电保护回路，而选取电流互感器一般则是要考虑对过载和短路进行可靠保护的，且电流互感器一次侧额定电流值一般总是要比长期额定负荷电流大三分之一左右，因此按电流互感器值选取的母线也有一定的裕度。对没有装设断路器（如装负荷开关）的高压开关柜，则以负荷开关上的热脱扣器额定电流值为准；当然如果没有热脱扣器，则以负荷开关的额定电流值为准，如果这些都没有，则以高压熔断器的额定电流值为准。

(2) 对于低压开关柜，应以自动空气开关的热脱扣器额定工作电流为准，如自动空气开关不带热脱扣器，则以其开关的额定电流值为准。对自动空气开关以下有数个分支回路的，如果分支回路也装有自动空气开关，仍按上述原则选择分支母线。如果没有自动空气开关，比如只有刀开关、熔断器、低压电流互感器等，则以低压电流互感器的一次侧额定电流值选取分支母线；如果这些都没有，还可按接触器额定电流选取；如果接触器也没有，最后才是按熔断器熔芯额定电流值选取。

## 2. 按经济电流密度选择

当正常持续工作电流  $I_g$  通过母线时，在母线中将引起电能损耗。当电流一定时，母线截面越大，电能损耗费用就越小。然而母线截面越大初投资越大，年维修折旧费也因此增加。总体来看，选择稍小的标准化截面可使母线初投资和有色金属耗用量减少，还是比较合适的。

开关柜汇流主母线及长度在 20m 以上的母线（例如发电机至开关柜等的连接母线），其截面可首先按经济电流密度选择。但按此原则选择的母线，其温升必须低于允许值，然后才按短路电流进行校验。按经济电流密度选择的公式为

$$S = I_g / J \quad (16-1)$$

式中  $S$  为所选用的标准截面 ( $\text{mm}^2$ )； $I_g$  为正常工作情况（没有考虑非正常情况下的过载）下的持续工作电流 (A)； $J$  为经济电流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ )，可按最大负荷利用  $h$  数  $T_{\max}$  查表 16-14 即得。

表 16-14 导体的经济电流密度  $J$  ( $\text{A}/\text{mm}^2$ )

导体材料	最大负荷利用 $h$ 数 $T_{\max}$ (h/年)		
	3000 以下	3000~5000	3000~5000
裸铜导线和母线	3.0	2.25	1.75
裸铝导线和母线	1.65	1.16	0.9
铜芯电缆	2.5	2.25	2.0
铝芯电缆	1.92	1.73	1.45
钢线	0.45	0.4	0.35

### 16.2.1.3 母线加工及搭接孔选择

母线加工，包括母线校正、下料和弯曲、钻孔及接触面加工等工序。母线加工质量的好坏将直接影响开关柜的质量及美观。

#### 1. 母线的校正及下料

母线本身要求很平直，弯曲的母线材料应进行校正，一般用矫直机进行校正。人工校正时，将母线放在一段表面平直、光滑、洁净的大型槽钢或工字钢上，用硬木做成的木锤敲打校正，如弯曲

较大，也可在弯曲部分上放置垫块，然后用铁锤敲打校正。为了不损伤母线，垫块应用软质材料如铝板、木板等，校正时用眼观察是否平直并寻找弯曲点。校直后，母线宽面的弯曲度每米不大于 2mm，窄面每米不大于 3mm。母线下料尺寸的确定，应先用硬铜芯线弯制成母线连接样板，然后用卷尺测量样板各段尺寸，加起来即为母线尺寸，再划线下料。下料时，母线（主要是弯曲成型的母线）要留有适量的裕度，避免弯曲时产生误差而造成整根母线报废。弯制好的母线事先应在它连接的电器线路上比照好以后，再切去端头多余的一小段。下料的切断面应平整无毛刺，否则应进行修锉。

2. 母线的弯曲

矩形母线的弯曲有三种方式：平弯（即宽面方向弯曲）、立弯（窄面方向弯曲）、扭弯（麻花弯）。母线的弯曲一般都是冷弯，如需热弯时，加热温度不应超过以下规定：铜，350℃；铝，250℃；钢，600℃。母线配制时应注意做到尽量减少弯曲数。母线弯制时应按下列规定进行：

（1）母线开始弯曲处，距最近绝缘子的母线支持夹板边缘不应小于 50mm，不应大于 0.25L，如图 16-27 所示。

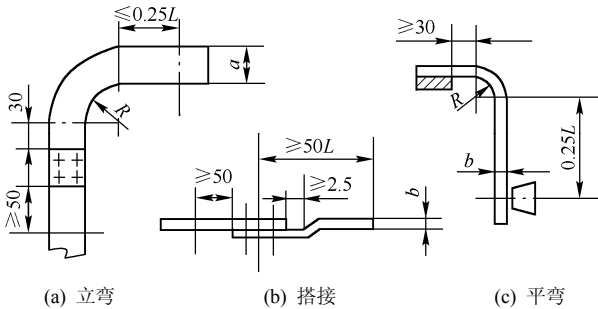


图 16-27 母线弯曲位置

图中：L 为母线两支持点间的距离，一般为 1m；a 为母线宽度；b 为母线厚度。

（2）母线开始弯曲处，距母线搭接位置不应小于 30mm，见图 16-27（a）。

（3）母线不宜直角弯曲，弯曲半径不得小于表 16-15 所列数值。

表 16-15 母线最小允许弯曲半径 R

弯曲种类	母线截面（mm <sup>2</sup> ）	最小弯曲半径 R（a 为母线宽度，b 为母线厚度）		
		铜	铝	钢
平弯	50×5 及其以下	2b	2b	2b
	125×10 及其以下	2b	2.5b	2b
立弯	50×5 及其以下	1a	1.5a	0.5a
	125×10 及其以下	1.5a	2a	1a

（4）麻花弯母线扭转 90° 时，其扭转部分的长度不应小于母线宽度的 2.5 倍。

（5）同一回路三相母线的平弯、立弯、麻花弯的起止点应在一条线上。

（6）同一相的两条并联母线，其弯曲度应一致。母线弯曲时，注意不可用力过猛或速度过快，以免产生裂纹。

3. 母线钻孔及接触面加工

图 16-28 是较典型的开关柜母线与电器端子的连接弯曲形式，可供弯制母线时参考。母线与电气设备或两母线搭接，大都是用螺栓连接，因此必须先将母线钻孔。母线连接螺栓数目和钻孔直径的选取有如下要求：

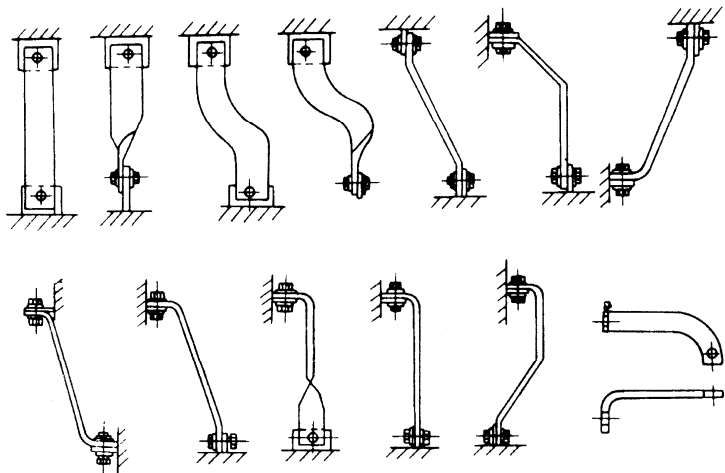


图 16-28 开关柜母线的连接弯曲形式

(1) 母线与母线搭接

详见表 16-16 母线连接孔表。

表 16-16 母线连接、钻孔尺寸参照表

类 别	序 号	连接尺寸及钻孔要求 (mm)				紧 固 件	
		母线 1	母线 2	$\phi$	孔数	螺栓	垫圈
直线连接	1	125	125	19	4	M18	A18
	2	112-71	112-71	16	4	M16	A16
	3	71-50	71-50	10	3	M12	A12
	4	45-40	45-40	10	3	M12	A12
	5	25.5-25	35.5-25	11	2	M10	A10
垂直连接	6	125	125	19	4	M18	A18
	7	125-80	112-71	16	4	M16	A16
	8	125-50	63-40	10	2	M12	A12
	9	71-45	50-25	11	2	M10	A10
	10	125-80	35.5-25	11	2	M10	A10
	11	40	40-25	10	1	M12	A12
	12	35.5-25	35.5-22	11	1	M10	A10

(2) 母线与电器组件搭接

母线应按电器接线端的孔数与大小进行钻孔。

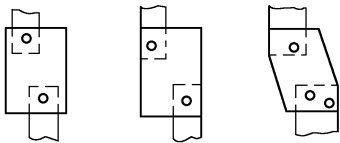


图 16-29 偏向母线一侧的连接示意图

(3) 偏向母线一侧连接

母线宽度大而长度短不能弯曲,可在不影响搭接面积的情况下,偏向母线的一侧划线打孔,参见图 16-29。

(4) 母线固定应打椭圆孔

用螺钉直接固定在绝缘子上的母线,其固定孔应打椭圆孔,这是考虑到母线安装及运行发热时,有一定的移动调节量。当母线长度超过 1m,母线必须加支持瓷瓶。

为了保证母线的连接质量,母线的搭接长度应大于或等于母线的宽度。母线与电器端子的搭接,其搭接长度距电器端子根部 10mm 即可,要注意将端子平面全部覆盖住。母线连接头孔眼的直径宜大于螺栓直径 1mm,钻孔应垂直,不歪斜,孔眼中心距离的误差不应大于 0.5mm,母线不宜用手提电钻打孔,这样钻出的孔质量不好。 $\phi 19\text{mm}$  以下的孔可以在小台钻上钻出, $\phi 20\text{mm}$  及以上的孔需要在立式钻床或摇臂钻床上钻;钻孔时要将钻头磨成平钻头,这样钻出的孔质量较好,钻完孔后用划窝子钻头划去飞刺。

母线连接、钻孔尺寸参见表 16-16。母线孔打好以后即可进行接触面加工。接触面,是指母线与母线及母线与电器设备端子连接时接触部分的表面。母线螺栓连接接触面,看起来好像很平整,但实际只有凸出点接触,所以接触面存在着接触电阻。接触电阻的大小与接触面的尺寸、接触面处理质量和接触面间相互的压力等有关。接触面加工越平,相互间压力越大,接触的点就越多,电流的分布就越均匀。一般规定,螺栓连接点的接触电阻,不能大于同长度母线本身电阻的 20%。若接触电阻过大,当额定电流通过接触面时,就会发生过热现象,以致引起事故。

接触面加工的主要作用是消除母线表面的氧化膜、折皱和隆起部分,使接触面平整而略呈粗糙。接触面的加工方法有两种:手锉加工方法简单易行,工效较低;机械加工一般用摩擦压力机,也可采用母线平整机加工。

#### 16.2.1.4 母线搪锡

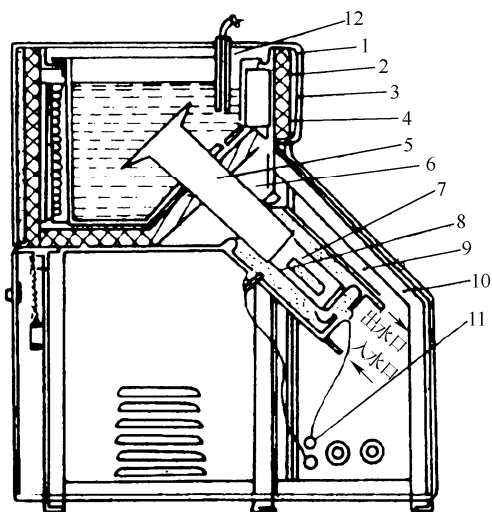
母线搪锡,是为了防止母线搭接处电化腐蚀而在接触面上镀一层锡。搪锡的基本工序如下:搪锡前的化学处理→搪锡→在搪好锡的连接部分涂中性凡士林→在未搪锡部分喷相序色漆。

母线在搪锡前应进行化学处理,这是因为轧制成的铜、铝母线都有很厚的氧化膜,且在运输过程中往往粘有油或其他污物,搪锡前的化学处理就是清除这些氧化膜或其他污物,这样搪锡质量才好。铝母线化学处理,是将铝母线浸渍在浓度为 20% 的碱水溶液中,浸渍时间的长短应根据母线表面氧化物及油污去除情况来确定。浸渍好的铝母线取出后,立即放入热清水槽中边冲洗边用毛刷刷洗干净,然后将清洗干净的铝母线拿出晾干或烘干,烘干后的铝母线即可搪锡。铜母线的化学处理,是将铜母线浸渍在浓度为 10% 的硫酸溶液或氧化锌溶液中,浸渍的时间很短,浸渍后即可搪锡。

母线搪锡的方法有两种:手工搪锡和超声波搪锡。手工搪锡是将经化学处理烘干后的母线,用细铜丝刷把熔化的锡点往应搪锡的部位上刷,直到均匀布满锡为止,使刷搪锡的表面略呈粗糙,以利增加接触点,但不应有锡堆积现象。搪锡的长度要大于 20mm (搭接长度) 以上,锡材料一般用锡 80%、锌 20% 的锡锌焊料,工作温度宜选择在高于锡料熔点 20℃ 左右。

手工搪锡也可将母线的搪锡部分涂上焊锡膏,浸入熔化的锡锅中,使锡附在母线的表面,母线从锡锅中取出时,用抹布擦去表面的浮渣,即露出搪好锡的银白色表面。母线搪完锡之后,应在搪锡部分涂上干净的中性凡士林油,这是因为搪锡层的孔隙率很高,当二氧化碳等气体侵入时,会造成电腐蚀,因此搪锡之后必须立即进行防蚀处理,然后在母线非搭接部分喷相序色漆。

图 16-30 是超声波搪锡装置的示意图。它的工作原理是由功率放大器输出的超声波频率的电流流经换能器的绕组时,换能器就产生相应频率的机械振动,振动通过变幅杆向熔化的锡液辐射声波,利用超声波在液体中传播时产生的巨大局部压力,将铝母线表面氧化膜破坏,从而使锡铝牢固结合。由于熔化的锡液通过变幅杆把热量传给换能器,以及换能器工作时自身也产生大量的



1—石棉板 2—石棉粉 3—外壳 4—锡锅 5—变幅杆 6—电炉 7—换能器  
8—测温表 9—冷却水筒 10—角钢架 11—接超声发生器 12—热电偶

图 16-30 超声搪锡装置断面示意图

热，因此必须用水进行冷却，以保证换能器的正常工作。根据搪锡的实际需要，超声波搪锡装置采用了电热器自动恒温、冷却水自动控制、电源自动切断、自动合闸等自动控制装置。超声波发生器的功率和搪锡面积成正比，为了保护换能器，在加热锡槽之前，应先送入冷却水，且不允许中断。锡槽停止使用后，必须待槽温降到  $100^{\circ}\text{C}$  以下，才可停供冷却水。

超声波搪锡的工艺如下：

(1) 将母线需搪锡部分插入锡槽，靠近传振杆的辐射面作匀速移动，移动的作用是克服辐射面声场分布不均匀的缺点和消除气泡对母线的附着

现象，以获得均匀平滑的搪锡面。

(2) 将搪上锡的母线取出，用约  $0.5\text{mm}$  厚的弹簧钢片或磷铜片等弹性材料刮去表面流锡，使锡层厚度在  $0.03\sim 0.1\text{mm}$ 。

(3) 将搪锡部分涂上中性凡士林油，然后将非搪锡部分喷上相序色漆。

#### 16.2.1.5 导电膏的应用

导电膏，是一种由极细的金属粉末与油脂混合为糊状的电器接触涂料，具有不流失、不老化的特点，能稳定接点的接触电阻和防止产生电化腐蚀现象。适用于铜-铜、铜-铝、铝-铝母线搭接面的涂敷，对不具备搪锡工艺、或母线不便搪锡处，可用导电膏代替搪锡工艺，使用较方便。

导电膏有较好的导电性能，是因为导电膏内的金属粉能充分地填充母线搭接面处的空隙，增大了母线间的有效接触面积，这就降低了接触处的接触电阻。另外，由于导电膏的油脂能密封住母线接触面，隔绝腐蚀气体的侵入，这就防止了电化腐蚀。目前我国生产的 TD1-1 号适宜在铜-铜、铜-铝母线接触面涂敷，TD1-2 号导电膏适宜在铝-铝母线接触面涂敷。导电膏的涂敷工艺如下：

(1) 搭接母线端头用压力机进行平整加工，其接触面不应出现划痕、磕碰现象。

(2) 清除母线表面的油污、氧化皮（根据不同的母排材料用碱洗或酸洗，方法同上述）。

(3) 在搭接面上预涂约  $0.3\text{mm}$  厚的导电膏。

(4) 将预涂了导电膏的搭接端头用钢丝刷进行擦涂，除掉预涂导电膏前瞬间产生的金属氧化膜，然后用棉纱擦去预涂导电膏，再重新涂上一层约  $0.3\text{mm}$  厚的导电膏。

(5) 如果两母线搭接，两母线的接触面应分别涂上导电膏。如果是母线与电器端子搭接，而电器端子已镀银或搪锡，则电器端子不需涂敷导电膏。

(6) 导电膏涂层要均匀，不宜过厚，涂敷面应无杂物。

(7) 导电膏盒（瓶）用后应旋紧，防止水蒸气及灰尘侵入污染膏体。

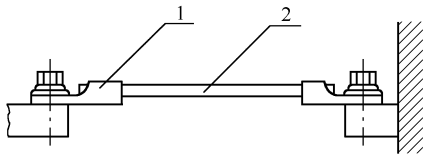
(8) 导电膏切勿与苯、甲苯、二甲苯混合。

16.2.1.6 其他形式的一次线连接

一次线在开关柜中除了用矩形母线连接外,对于用矩形母线难以弯制连接的回路和电流较小的回路,也常常用铜编织线和塑胶绝缘硬线来连接。这些连接线制作简单,连接方便,在开关柜的一次线中,应用较为广泛。铜编织线和塑胶绝缘硬线的外表绝缘层颜色,和母线喷色漆一样应能识别电路。因此在根据电路选择导线颜色时,应与母线颜色的规定相符合。

1. 塑胶绝缘硬线及压接端头的选取

用塑胶绝缘硬线作一次线大多数都是 6~50mm<sup>2</sup> 的铜芯线。由于导线的接触面与接触电阻成反比,为了增大接触面和连接可靠,因而铜芯线一般都要用铜制裸压接端头(俗称线鼻子)与线芯压接,然后进行搪锡处理,再用压接端头与电器端子连接,如图 16-31 所示。



1—压接端头 2—铜芯线

图 16-31 用压接端头与电器端子连接示意图

表 16-17 聚氯乙烯绝缘线载流量(A)

截面 (mm <sup>2</sup> )	BV BVR 铜芯线			
	25℃	30℃	35℃	40℃
1	19	16	16	16
1.5	24	22	20	18
2.5	32	29	27	25
4	42	39	36	33
6	55	51	47	43
10	75	70	64	59
16	105	98	90	83
25	108	129	119	109
35	160	168	167	104
50	216	201	185	160

铜芯导线一般用 BV 或 BVR 型聚氯乙烯绝缘线,线芯允许长期工作温度 65℃,导线截面选择与母线截面选择方法基本相同,即其原则是导线的额定电流值不得小于实际线路通过的电流值,导线截面的选取见表 16-17。表内所注的温度为夏季平均最高环境温度。

压接端头不应有飞边、毛刺、变形及起层等外观缺陷。压接端头如图 16-32 所示。压接端头的选用按表 16-18。有时在不知压接端头规格的情况下,可用测量压接端头最窄处宽度的方法来确定选取截面积,即测出压接端头的宽度和厚度后,相乘就得出了该处的截面积,此截面积必须大于或等于与之压接的导线截面积。

表 16-18 压接端头选用表

型 号	插入导线截面 (mm <sup>2</sup> )	紧固螺钉 (M)
OT4—6	3~4	6
OT6—6	5~6	6
OT10—8	8~10	8
OT16—8	16	8
OT25—10	20~25	10
OT35—10	25~35	10
OT50—12	50	12

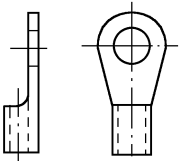


图 16-32 OT 压接端头

2. 压接端头与导线的压接工艺

- (1) 剥去导线表皮的绝缘层,剥去的长度应比压接端头的插套长 3mm 为宜。
  - (2) 将导线用钢丝钳绞紧后插入压接端头的插套里,用硬木榔头拍打压紧或用冷压钳压紧,然后用力拉导线,导线不应从压接端头插套中拉出。
  - (3) 将压接好的压接端头浸入 10% 硫酸液中或氯化锌溶液中除去氧化层,然后浸入锡锅搪锡。
  - (4) 将搪上锡的压接端头,从锡锅取出后,用油漆刷将多余的锡粒刷去使锡层均匀。
- 注意:压接端头切不可与铝芯线压接,因铝芯线软,与压接端头压接后易造成连接处断裂,

且铜、铝在连接前必须作防电化腐蚀处理。

## 16.2.2 开关柜二次回路接线

开关柜的二次回路接线（简称二次接线），包括二次组件的安装，如各种继电器、仪表、指示灯、按钮及指令开关等组件的安装。二次接线包括除主回路一次线连接以外的全部各种接线，如自动开关的保护装置接线，接触器的控制线圈接线等。二次线的连接方式有螺栓连接、插接、焊接等。

### 16.2.2.1 二次组件的安装

#### 1. 二次组件的安装要求

(1) 继电器及仪表送到现场后，应对其进行细致的外部检查（但不应打开外壳）。检查时应注意玻璃是否完整，其指针与接线端子是否处于完好状态，塑料外壳有无孔洞或裂纹，检查完后将灰尘擦净。

(2) 所有要安装的继电器及仪表要有产品合格证，否则不能安装。

(3) 固定继电器及仪表的螺栓孔眼的直径应比螺栓的直径大 2mm，以便调整，对板后接线的继电器及仪表，其导电螺杆孔眼的直径应比导电杆孔眼的直径大 8~10mm，以保证足够的绝缘间隙。

(4) 组件的安装方式要符合该组件说明书的规定，测量仪表及继电器应垂直安装，以保证组件的正常工作。组件安装后适当校正组件的位置，组件排列从视觉上要横平竖直，整齐美观。

(5) 安装在屏后的二次组件，应尽量靠屏的上方或下方或一侧，以不妨碍其他组件的正常维护为原则。对没有绝缘底座的组件，如储能电容器、硅二极管等，应先固定在绝缘底板上，然后再往屏上安装，不得有半空悬挂组件任其自由晃动的现象，屏后组件同样应排列整齐，层次分明。

(6) 安装二次组件时，应注意组件之间的电气间隙和爬电距离。导体与裸露的不带电的导体间的最小电气间隙为 4mm，爬电距离 6mm（包括二次接线），屏顶小母线裸露载流部分与未经绝缘的金属体或载流部分之间，电气间隙不小于 12mm，爬电距离不小于 20mm。

(7) 当仪表、继电器等安装在金属板上，其接线螺栓要穿过金属板时，应将其接线螺栓套上绝缘管。

(8) 发热组件的安装，宜远离继电器，装于柜顶或其他地方，以不影响其他组件的正常工作为准。

#### 2. 端子排的安装

##### (1) 端子的类型

接线端子（简称端子）是二次接线中不可缺少的配件。柜（屏）内设备与屏外部设备之间的连接是过端子和电缆来实现的。许多端子组合在一起构成端子排，一般端子排都安装在柜（屏）内的左右两侧及下部。端子按用途可分成以下几种类型：

① 一般端子（B1—1 型）：用于连接屏内外导线（电缆）。

② 试验端子（B1—2 型）：用于需要接入试验仪表的电流回路中。此种端子是专供电流互感器二次回路用的，所以又称电流端子。利用它可以在不切断二次回路情况下，校验仪表和继电器。

③ 连接型试验端子（B1—3 型）：用于电流端子上需要彼此连接的电流试验回路中。

④ 连接端子：端子间进行连接用。

⑤ 终端端子：用于固定端子或分隔不同安装单位的端子排。

⑥ 特殊端子（B1—7 型）：用于需要很方便地断开的回路中。



### (2) 端子排的排列

端子排的排列应使运行、检修及调试方便,并适当照顾设备与端子排的相对应位置。应经过端子排连接的回路有如下几种:

① 柜屏内设备与柜外设备之间的连接,必须经过端子排。其中交流电流回路应经过试验端子,在运行中需要很方便地断开的回路,应经过特殊端子或试验端子。

② 柜屏内设备与直接接到小线的设备,如附加电阻、熔断器或小刀闸等的连接一般应经过端子排。

③ 各安装单位主要保护的电源一般由端子排引接。

④ 同一柜屏内各安装单位之间的连接应经过端子排。每一安装单位的端子排编有顺序号,在最后应留 2~5 个端子作为备用;当端子排长度许可时适当地多留 1~2 个备用端子。正、负电源之间,经常带电的正电源与合闸跳闸回路之间的端子应不相邻或者以一个空端子隔开,以免使端子排造成短路或使断路器误动作。

一个端子排的每一端一般只接一根导线,导线截面积不超过  $6\text{mm}^2$ ,最多允许接两根导线。

#### 16.2.2.2 二次回路接线的基本要求

二次回路接线,是在二次组件安装完成后进行。根据国家标准 GB2681—81 电工成套装置中的导线颜色规定,开关柜中的二次连线颜色为黑色,接地线为黄绿双色。二次接线的要求如下:

(1) 按图施工,连线正确。

(2) 二次线的连接,包括螺栓连接、插接、焊接等,均应牢固可靠,线束应横平竖直、配置坚固、层次分明、整齐美观。

(3) 二次配线应采用截面不小于  $1.5\text{mm}^2$  的铜芯绝缘线,导线的绝缘应按工作电压不低于 500V 来选择,在经常受到弯曲的地方,如门上电器与柜内连线,则应使用多芯软绝缘线,在可动部位两端,应有卡子固定。

(4) 所有二次回路的仪表、继电器、电器的二次连线端子、端子排、小母线及连接导线均应标号,标号应完整、清楚、牢固、不褪色。

(5) 所用连接导线不应有接头,每个端子排的每侧接线一般为一根,不得超过两根。

(6) 对电子组件回路或其他弱电装置回路,当采用锡焊连接时,在满足载流量和电压降及有足够机械强度的情况下,可使用较小截面的绝缘导线,一般为  $0.5\text{mm}^2$  线。

(7) 二次配线的线束,不应直接在铁板或导电部件上敷设,必须腾空 3~5mm,也可装入行线槽内。

(8) 绝缘导线穿越金属构件时,应有保护绝缘导线不被破坏的措施,如在导线穿越金属析的孔上穿戴橡胶圈等。

(9) 同一工程编号的产品,所有的导线色泽和布线格式应该一致。

#### 16.2.2.3 典型接线工艺

接线过程一般由下线、剥线头、套标号管、弯头、接线、走线、捆扎线束、检查等工序组成。

##### 1. 下线

(1) 根据走线方案量材下线,下线的长度要比试测的线路长约 40~50mm,以防导线经捆扎后长度不够。

(2) 将下好的线用木模或其他光滑器具勒直,但导线不得用虎钳、钢丝钳等强行拉直。

(3) 凡是用在可转动的门或面板上的导线，必须采用多股软线；下线时应考虑，其受弯曲的地方应留有适当的裕度。固定面板及配架上的导线可用单股硬线。

2. 剥线头

表 16-19 线头剥线长度

螺钉直径 (mm)	3	4	5	6	8
剥线长度 (mm)	16	18	21	24	28

(1) 根据需要的长度和线径用剥线钳剥削线头，剥头时不应损伤铜丝表面，如遇表面有氧化膜存在，可用电工刀刮干净。

(2) 剥线长度应按电器部件接线板上螺钉的直径确定，详见表 16-19。

3. 套标号管

(1) 按照图纸的要求选取相应的塑料标号管套上，且不能将标号管反套，且不得互相错位。

(2) 标号套管字迹的视读方向，以板面为准，自下而上，自左而右。

(3) 标号套管的字体要求用号牌打字机打出（也可用英文打字机打），打好后，用固色剂喷涂，这样标号套管上的字就不会因为各种原因掉色而使字体模糊不清。固色剂的配方是：环己酮 500ml、聚氯乙烯粉末 2.5g、醋酸丁酯 32ml。将上述溶液混合搅匀后加入聚氯乙烯粉末待溶解即可。

4. 弯头

凡是在电器部件的接线板用螺钉直接紧固导线时，其连接部分必须弯圆圈，圆圈与标号套管之间的距离为 2mm，弯圆圈方向与压紧螺母拧紧方向一致，即向右旋，其内径应比紧固螺母的内径大 1~2mm，如图 16-33 (a) 所示。

图 16-33 (b) 所示的 8 种圆圈都是不正确的：(1) 圆圈不完整，接触面小；(2) 线头根部太长，相邻线易碰触造成短路；(3) 导线余头长，压不紧，接触面小；(4) 圆圈弯曲方向反了，容易松散；(5) 圆圈不圆，压不紧，接触不良；(6) 无用的余头未剪去，工艺不佳，带电时裸露部分过长；(7) 只有半个圆圈，压不紧；(8) 圆圈有毛刺，易造成线间短路。

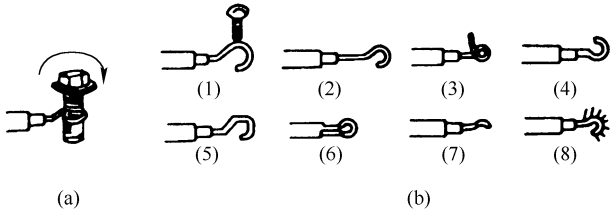


图 16-33 导线端头弯圈连接

5. 接线

(1) 将弯好的接头圆圈，接到电器部件接点上用螺帽或螺钉旋紧，各紧固螺钉紧牢后，露出 3~5 牙螺纹为宜，螺钉头起子槽应完整。

(2) 接好线后从垂直方向看，不得有导体的裸露。

(3) 每个电器部件的接点，最多允许二个接线头；二个接头之间要加垫一个与螺钉直径相称的垫圈，如图 16-34 所示。

(4) 在一次母线上连接二次线时，需

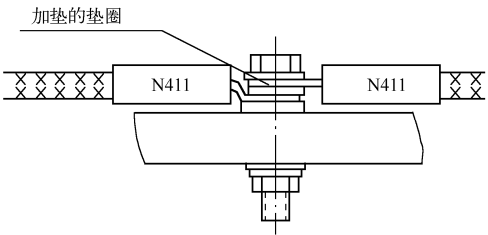


图 16-34 两个接线头的接法

在母线上钻  $\phi 6$  孔用 M5 螺钉连接。

(5) 二次线接到电阻上时, 须用电铬铁将焊锡把接头焊牢, 然后用相称的塑料管套好, 接头处不应有松动现象。

(6) 电器部件采用直接压线连接时, 剥去导线绝缘层, 不弯圆圈, 接点直接用螺钉压线, 压线后从垂直方向看, 不应有导体部分外露。

(7) 导线需通过金属孔时, 必须在金属孔上装上绝缘皮套圈, 以免损坏导线绝缘层, 不允许导线从母线相间或安装孔中穿过。

(8) 在一般情况下, 导线不允许弯许多类似弹簧样的圆圈后接线, 但接地线例外。

(9) 每个端子的接线点, 只允许接一根线, 如果端子间需连接, 可按图 16-35 所示方法配制。

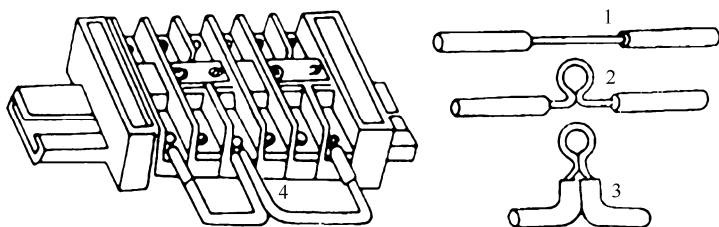


图 16-35 端子连法 (1—剥头, 2—曲圈, 3—折弯, 4—接头)

## 6. 走线

(1) 自上而下地将线束理成方形、长方形 (线束太大也可理成圆形), 然后分路, 并将上下笔直的线路放在外挡, 上下折弯的线路顺序放入内挡。

(2) 根据走线方案, 导线需要弯曲转换方向时, 用手指进行弯曲后再直或横行走, 不得用尖嘴钳或其他锋利工具弯曲, 以保证导线绝缘层不受损伤, 如图 16-36 所示, 导线弯曲线半径不得小于导线外径二倍。

(3) 导线敷设途中如遇金属障碍, 则应弯曲越过, 中间保持 3~5mm 的距离, 如图 16-37 所示。

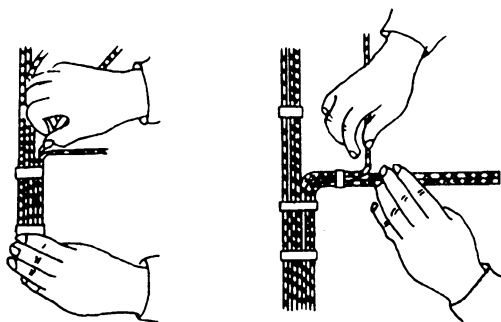


图 16-36 导线弯曲换向方法

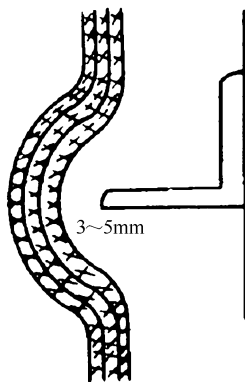


图 16-37 导线越过金属障碍

(4) 从分路部分到继电器的线束, 一律按水平居中向两侧分开的方向行走, 到继电器接线端的每根略带圆弧状连接, 同一块安装板上的各种继电器接线圆弧应力求一致, 如图 16-38 所示。

(5) 分路部分到双排仪表的线束, 可用中间分线的布置, 如图 16-39 所示。

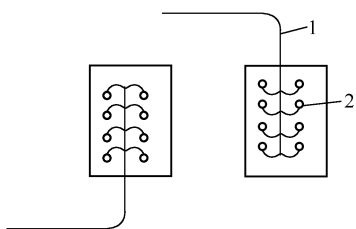


图 16-38 配接断电器形式(1—线束,  
2—继电器受电端钮)

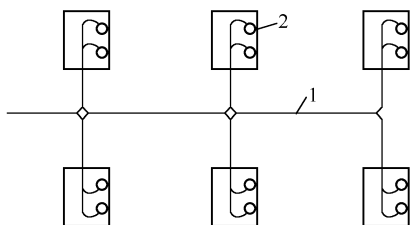


图 16-39 双排仪表的配接形式(1—  
线束, 2—仪表接线端钮)

(6) 分路部分到单排仪表的线束布置如图 16-40 所示。

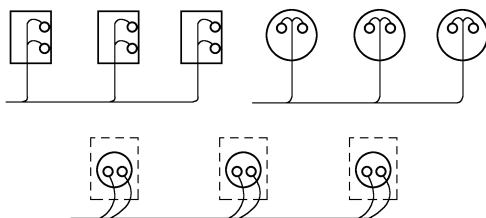


图 16-40 单排仪表的配接形式

(7) 分路部分到按钮、信号灯、熔断器、控制开关等部件的线束布置，原则上按横向对称行走，见图 16-41，但如果受到位置上的限制，允许直向对称行走。

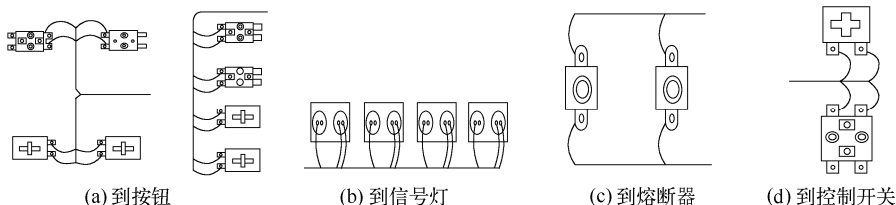


图 16-41 线束到各种电器组件的配接形式

(8) 在门部分的线束中，当两端线脚固定后，线束本身必须留有适当的长度余量，以门打开不大于  $100^\circ$  时，线束不致过分拉紧为限，并在转动中不碰到箱体。

## 7. 扎线

(1) 单层线束排列不得超过 9 根，在走线架上线束排列允许与走线架宽度相同。

(2) 线束必须用塑料带按顺时针方向扎紧，再用铝扎皮夹紧。在导线较多情况下，如无法排列成长方形或方形线束时，可先将导线理顺整齐，然后采用塑料带包扎的方法，将导线扎成圆形。线束中间的扎线处要均匀分布，其横向扎线距不得大于 50mm，纵向距离不得大于 200mm，如图 16-42 所示。

(3) 扎线处要求扎紧，用手滑动，不得松动，如图 16-43 所示。

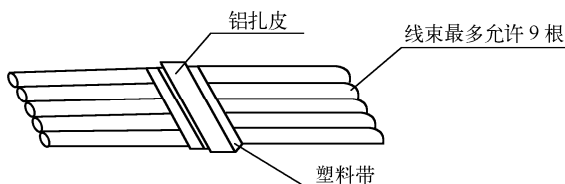


图 16-42 单层线束排列

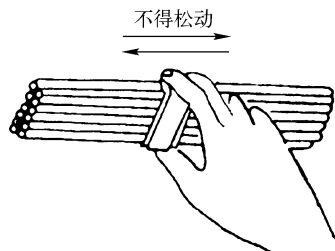


图 16-43 扎线处要求扎紧

(4) 所有扎线处不得凸凹不直或有歪斜现象, 如图 16-44 所示。

(5) 可动部分的线束, 为了防止与金属摩擦, 原则上一定要加套塑料缠绕管, 比如在门上可动部分的线束要加套塑料缠绕管, 如图 16-45 所示。

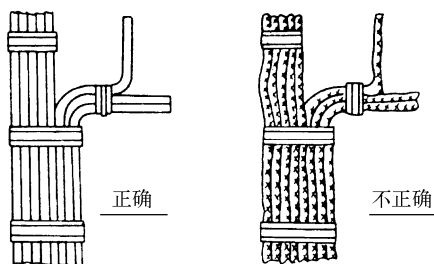


图 16-44 扎线处要求平直

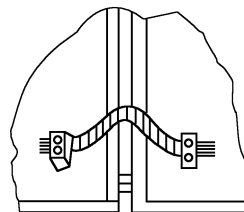


图 16-45 门上可动部分的线束

(6) 导线束与带电体之间的距离不得小于表 16-20 中所规定的的数据。

表 16-20 导线束与带电体间的最小距离

额定电压 (kV)	距离 (mm)
0.5	16
3	75
6	100
10	100
35	300

(7) 线束原则上不应在信号灯、电阻器等发热电器上方布设, 否则应有 30mm 以上的距离, 并用压线铁脚固定。

(8) 导线束过长时, 不允许两端中间有摆动现象, 必须采用铁脚固定。

#### 8. 检查

(1) 先检查接线是否正确。查对的工具可采用干电池供电的通灯或蜂鸣器, 根据接线图或原理图进行; 对接线的两端通电见通灯亮或听到蜂鸣响即表明接线正确, 不响或不亮即表明这一根线接错。查对的顺序是先从端子排自上而下逐个端子进行查对, 而后再对各电器间的连线进行查对。

(2) 检查接头的质量。接点螺钉是否拧紧, 同一接点的接头质量是否符合要求, 弯圈方向是否正确, 导线绝缘层及导体有无损伤。

(3) 线路布设是否平直整齐, 扎线的质量、导线弯曲半径、标号牌套管、端子排安排等是否符合要求, 同一工程所有材料是否一致。

(4) 所有组件不接线的端子都需配齐螺钉、螺母、垫圈等。

#### 16.2.2.4 弱电组件的装配工艺

弱电组件, 一般泛指电子元器件或某些电子电器, 如晶体管、放大器、稳压电源等, 因为它们耗电少, 工作电压低, 所以又统称弱电组件。随着电气技术的发展, 弱电组件越来越多地用在开关柜装置上, 如某些电力拖动装置, 合闸电源等。它们的安装与焊接也是开关柜装置生产中不可忽略的一部分。

##### 1. 常用零部件装配工艺

从装配工艺程序看, 零、部件装配内容主要包括安装和紧固两部分。安装, 是指将装配件放置在规定部位的全部过程。装配件的结构组成不外乎有电子元器件、机械结构、辅助构件和紧固零件等, 安装的内容, 是指对装配件的安放应满足其位置、方向和次序的要求, 直到紧固零件全部套上、入扣为止。元器件安置方向, 是指其接点标记号所处的方向, 尤其要注意完全对称元器件的方向。次序反映了装配关系, 即各类有关零件相互间的位置和层次关系。弱电组件的安装要求包括: 合理

布置、正确安装、插接可靠、维修方便等。对功率较大的发热组件，应主要从散热角度考虑布置，如电源变压器、大功率整流二极管、输出部分的功率驱动部件、限流电阻、降压电阻等发热量较多的部件，应安装在通风和对流条件较好的地方，并要防止它们散发热量影响邻近电路。

紧固，是在安装之后用工具对紧固零件拧紧的工艺过程。通过紧固使装配件在机械上得到固定。在拧紧的过程中，有时还要对装配件的位置关系进行调整，方向上也要纠正，使之对称、整齐，完全符合图纸和技术条件的要求。

在操作中，安装与紧固是紧密相联的，有时难以截然分开。当主要元件放上后，一般都不拧得很紧，待元件位置初步得到固定后稍加调整拨正，再作最后的固定。

下面介绍几种常用零、部件的装配。

### (1) 电位器的安装

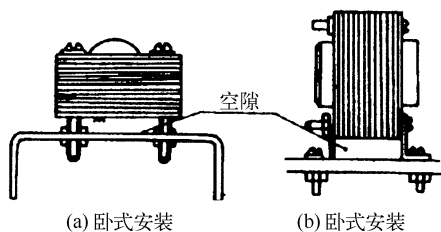
根据使用要求，安装电位器时，一般应注意两点：

① 有锁紧装置时的安装。这里指对电位器芯轴的锁紧。芯轴位置是可变的，能影响电阻值。在安装时由固定螺母将电位器固定在装置板上，用紧锁螺母将芯轴锁定，在振动、冲击中不发生角位移，拧动锁紧螺母不直接碰到芯轴，施加的是渐近力，不影响已调好的轴位，容易锁定在最佳点上，且便于调试。拧紧时用 2 寸起子应拧不动芯轴，拧松时芯轴应能被轻松地转动。

② 有定位要求时的安装。定位，是指元件本身的定位和元件转轴的定位。装配件必须具有两个以上的紧固点才可能得到位置上的固定。因此，在元件上往往设置定位圈，定位销和定位凸缘与装置板上相应的定位孔、定位槽相嵌，当轴向得到固定后，不致产生径向位移，在安装中必须使定位装置准确入位。

### (2) 小型电源变压器的安装

变压器安装的位置和方向主要着眼于安装方便，同时，也要考虑减小漏磁场和温度等对周围的影响。变压器装在铁底板上时宜离开一个空隙，以减小漏磁的影响，如图 16-46 所示。另外，



(a) 卧式安装

(b) 卧式安装

图 16-46 小型电源变压器的安装

在变压器的出线端应注意高压端子对邻近端子可能引起的泄漏，一般可增加高压出线端与邻近端头间的距离。从人身安全的角度考虑，变压器的高压出线端应选择不易被维修人员误触及的位置，或者另设绝缘护套。

### (3) 电解电容器的安装

电解电容器，是在两条铝箔带中间夹有浸过电解液的纸带卷绕而成，有正负极性，在使用时不能接反，否则将使氧化铝层击穿。这种电容器电容量较大，应用较多，如整流滤波、储能跳闸等电路里都要用它。电解电容器在安装时应注意尽量避免受邻近发热组件的烘烤，防止因内部电解液干涸而降低容量。铝壳电解电容器的安装方式以出线端向上的立式装置为好，这是因为电解电容器可能有漏液的质量问题，当接线端向下安装时，电解液有可能从封口处渗漏出来，加速内部干涸，亦将影响附近电路。

铝壳式电解电容器，如果只有一个电极（正极）则外壳为负极，在安装时要注意外壳与金属底板间的电位关系，不属于同电位时要加以绝缘。在铝壳上没有接线焊片时，负极的引线可用铜皮做的电容夹，夹紧电容器的铝壳，而引接线则从电容夹引出或者在电容夹与铝壳间夹一片铜箔，引线从铜箔上焊出。

也有铝壳不作为负极使用，而在接线端多设一个负极端。对于这种电容器，它的铝外壳和

正负两个接线端都不相连接。但在安装时,不能认为外壳和正、负两个接线端是可靠绝缘的,因此不能靠在金属底板上安装。因为,当外壳接地时,相当于正极对地有一电流通路,从而易造成电路故障;可用一电容夹将电容器固定在胶木板上,如图 16-47 所示。

#### (4) 散热器的安装

在安装时,器件与散热器之间的接触面要平整、清洁,装配孔距要准确,防止装紧后安装件变形、减小实际接触面积、人为地增加界面热阻。散热器上的紧固件要拧紧,保证良好的接触,以有利于散热。为使接触面密合,往往在安装接触面上涂些硅脂,以提高散热效率,但涂的数量和范围要适当,否则将失去实际效果。散热器的安装部位应放在机器的边沿、风道等容易散热的地方,有利于提高散热效果。

对于整流二极管和可控硅等发热量较大的组件,往往需要加装散热板。散热板的面积与组件的耗散功率有关,但安装时容易忽视散热板与组件的接触以及散热板安装位置的通风条件。散热板的外形不必进行光洁加工,粗糙的表面相当于增加散热面积。散热板的涂色一般是无光黑色,它有利于辐射散热。安装时散热板与管子的接触要紧密,导热才良好,这就要求散热板与管子的接触面要平整,安装的紧固螺栓要拧紧。如果散热板与管子的接触良好,则在工作过程中,管子的温度仅略高于散热板的温度。对于大功率硅二极管、可控硅散热板的安装必须从有利于空气对流的角度或强迫通风的风向来考虑,也就是说散热板的槽子要顺着风向。

另外,在安装时应注意,一般硅二极管和可控硅的散热板都具有阳极电位,因而像这类散热板都应装在经过绝缘处理的胶木板上。

#### (5) 印制板的安装

为维修方便,印制板多为插接安装,即用印制板的一端做插头,对应于插座的形式做成插齿状。由于印制板容易弯翘变形,又容易使插头座松脱,所以必须加设导轨和拉簧等,以保证插接稳固和接触良好,如图 16-48 所示。印制板常用直插和横插的安装方式,一般不采用倒插。横插也有水平横插和垂直横插两种,图 16-48 (a) 为直插、图 (b) 为垂直横插。选择何种结构形式,主要由总体布局、走线和使用方便等因素而定。

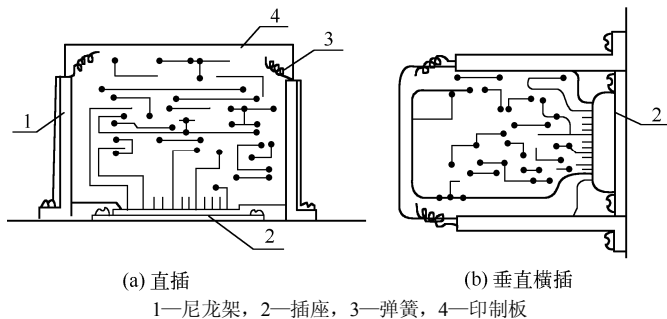
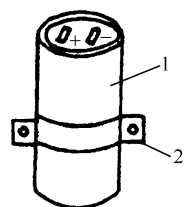


图 16-48 印制板的插接形式

若一个装置上同时有几块印制板需要插接时,要有防止插错的措施,例如,插头座用不同的颜色或不同形式,或标上不易脱落的明显标志。

#### 2. 锡焊接

弱电组件的连接,一般是焊接。焊接还广泛用于开关柜中的小型继电器、电阻器等组件的连



1—电解电容器 2—电容器夹

图 16-47 电容器的安装方法

接。焊接的质量不好，往往会影响装置的正常使用。其焊接方法与电子设备的方法相同，但焊接次序与连接方法有其自身的特点与要求。

#### (1) 焊接次序

一般是先焊细导线和小型组件，后焊管子和较大的组件。因为大组件占的空间大又比较重，后焊比较方便。管子怕热，后焊可以防止因焊接其他导线时，烙铁的热量由导线传到管子内部而造成损坏。焊接管子的引线时，动作要快，最好一次成功。焊接时用镊子夹住引线，使由烙铁头传来的热量沿着镊子散走，待焊锡凝固后才放开。

#### (2) 连接方法

焊接时导线的剥头要短，除焊点外，尽量减少导线的裸露部分，以防意外的短接。导线与插座接脚或接线柱等焊接时，有导线绕弯和不绕弯两种形式。导线在接线柱绕弯后再焊接，则焊点可靠，但拆卸时很不方便，一般在试制装置调试单元时，可采用不绕弯的方式，便于调动。对于已成熟的定型设备，从可靠性出发，应采用绕弯的方式，但在绕弯时稍留出一点线头，以便维修时解头方便。用焊片连接时，可把组件引线和导线钩在焊片孔内，再行焊牢。用小铆钉连接时，组件引线要插在铆钉孔内焊牢。用印制电路板时，组件引线穿过焊孔后，要把引线压倒 1mm 左右，再与铜箔焊在一起，因铜箔较薄，引线透过太少时不易焊牢；组件安装在印制板上时，引脚的长度要留有余地。

通过电流比较大的粗导线，可以在螺钉上连接，但要把导线端头焊在焊片上，并把焊片套在螺钉上，再用垫片、弹簧垫圈和螺母压紧。



## 第 17 章 电子设备调试与检验

### 17.1 电子设备调试检验基础

电子设备装配完成之后,必须通过调试才能达到规定的技术要求。装配工作仅仅是把成百上千的元器件按照设计图纸要求连接起来,每个元器件的特性参数都不可避免地存在着微小的差异,其综合结果会使电路的各种性能出现较大的偏差,加之在装配过程中产生的各种分布参数的影响,不可能使整机电路组装起来之后马上就能正常工作,使各项技术指标达到设计要求。因此,必须进行调试。

调试工作是按照调试工艺对电子设备进行调整和测试,使之达到技术文件所规定的功能和技术指标。调试既是保证并实现电子设备的功能和质量的重要工序,又是发现电子设备的设计、工艺缺陷和不足的重要环节。从某种程度上说,调试工作也是为电子产品定型提供技术性能参数的可靠依据。

电子设备的整机检验是考核其是否合格的主要手段,当产品运抵目的地安装后,应按整机检验进行检查后才能投入使用。整机检验是制造厂为保证出厂产品与通过型式试验的产品一致性所必须进行的试验,制造厂用整机检验来作为判定电子设备是否合格的依据,通过了这些试验就是合格的,反之就不合格。电子设备的整机检验项目是依据该产品的技术条件制定的,不同类型的和型号的电子设备的整机检验的具体内容不同。

#### 17.1.1 调试内容和步骤

##### 17.1.1.1 调试工作的内容

调试工作包括调整 and 测试两个部分。调整,主要是指对电路参数的调整,即对整机内可调元器件及与电气指标有关的调谐系统、机械传动部分进行调整,使之达到预定的性能要求。测试则是在调整的基础上,对整机的各项技术指标系统地进行测试,使电子设备各项技术指标符合规定的要求。具体说来,调试工作的内容有以下几点:

- (1) 明确电子设备调试的目的和要求。
- (2) 正确、合理地选择和使用测试仪器、仪表。
- (3) 按照调试工艺对电子设备进行调整和测试。
- (4) 运用电路和元器件的基础理论知识去分析和排除调试中出现的故障。
- (5) 对调试数据进行分析、处理。

简单的小型整机调试工作较为简便,一般在装配完成之后直接进行整机调试。而复杂的整机调试工作较为繁重,通常先对单元板或分机进行调试,达到要求后进行总装,最后进行整机总调。

调试工作一般在装配车间进行,严格按照调试工艺文件进行调试。比较复杂的大型设备,根据设计要求,可在生产厂进行部分调试或粗调,然后,在安装场地或试验基地,按照技术文件的

要求进行最后安装及全面调试。

### 17.1.1.2 调试方案

#### 1. 调试方案的内容

调试方案的制订,对于电子设备调试工作的顺利进展十分重要,它不仅影响调试质量的好坏,而且影响调试工作效率的提高。因此,事先制订一套完整的、合理的调试方案是非常必要的。

调试方案,是指制订出一套适合某一类设备调试的内容及做法。按照调试方案去做,就能使调试工作进行顺利并能取得良好的效果。调试方案应包括以下基本内容:

- (1) 调试内容应根据国家或企业颁布的标准及待测设备的等级、规格具体拟定。
- (2) 调试设备(包括各种测量仪器、工具、专用测试设备等)的选用。
- (3) 调试方法及具体步骤。
- (4) 调试条件与有关注意事项。
- (5) 调试安全操作规程。
- (6) 调试所需要的数据资料及记录表格。
- (7) 调试所需要的工时定额。
- (8) 调试责任者的签署及交接手续。

以上所有内容都应在有关的工艺文件及表格中反映出来。

#### 2. 制订方案的原则

对于不同的电子设备其调试方案是不同的,但是制订的原则、方法具有共性,大致如下:

- (1) 根据产品的规格、等级及商品的用途,确定调试的项目及主要的性能指标。
- (2) 在深刻理解该产品的工作原理及性能指标的基础上,着重了解电路中影响产品性能的关键元器件及部件的作用、参数及允许变动的范围,这样不仅可以保证调试的重点,还可提高调试工作的效率。
- (3) 考虑好各个部件本身的调整及相互之间的配合,尤其是各个部分的配合,因为这往往影响到整机性能的实现。
- (4) 调试样机时,要考虑到批量生产时的情况及要求,即要保证产品性能指标在规定范围内的一致性,不然的话,要影响到产品的合格率及可靠性。
- (5) 要考虑到现有的设备及条件,使调试方法、步骤合理、可行,使操作者安全、方便。
- (6) 尽量采用先进的工艺技术,以提高生产效率及产品质量。
- (7) 在调试过程中,不要放过任何不正常的现象,及时分析总结,采取新的措施予以改进提高,为新的调试工艺提供宝贵的经验与数据。
- (8) 调试方案的制订,要求调试内容订得越具体越好,可操作性要强。测试条件要写得仔细清楚;调试步骤应有条理性;测试数据尽量表格化,便于观察了解及综合分析;安全操作规程的内容要具体,要求明确。

### 17.1.1.3 设备调试的一般程序

由于电子设备种类繁多、电路复杂,各种设备单元电路的种类及数量也不相同,所以调试程序也不尽相同。但对一般电子产品来说,调试程序大致如下:

- (1) 在整机通电调试之前,各部件应该先通过分别调试和装配检验。
- (2) 检查确认产品的供电系统(如电源电路)的开关处于“关”的位置,用万用表等仪表

判断并确认电源输入端无短路或输入阻抗正常,然后顺序接上地线和电源线,插好电源插头,打开电源开关。接通电源后,此时要观察电源指示灯是否点亮,注意有无异样气味,产品中是否有冒烟的现象;对于低压直流供电的产品,可以用手摸测一下有无温度超常。如有这些现象,说明产品内部电路存在短路,必须立即关断电源,检查故障。如果看来正常,可以用仪器仪表(万用表或示波器)检查供电系统的电压和纹波系数。

(3) 按照电路的功能模块,根据调试的方便,从前往后或者从后往前地依次把它们接通电源,分别测量各电路(或电路各级)的工作点和其他工作状态。注意:应该调试完成一部分以后,再接通下一部分进行调试。不要一开始就把电源加到全部电路上。这样,不仅使工作有条不紊,还能减少因电路接错而损坏元器件,避免扩大事故。

(4) 如果是大批量生产的产品,应该为产品的调试制作专用工装,这样能够极大地提高测试的工作效率。可以采用测试针床的形式:把产品电路板装卡在一个支架上,弹性顶针把电源、地线、输入/输出信号线从板下接通到电路板上,方便地加电、断电、测量、观察。图 17-1 是电路测试针床的示意图,其中图(a)~(c)是顶针的形式,图(d)是顶针的内部结构。

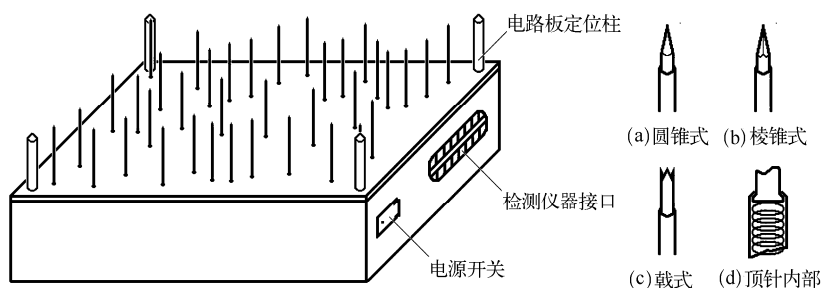


图 17-1 电路测试针床示意图

(5) 在进行上述测试的时候,可能需要对某些元器件的参数做出调整。调整参数的方法一般有以下两种。

① 选择法。通过替换元件来选择合适的电路参数。电路原理图中,在这种元件的参数旁边通常标注有“\*”号,表示需要在调整中才能准确地选定。因为反复替换元件很不方便,一般总是先接入可调元件,待调整确定了合适的元件参数值之后,再换上与选定参数值相同的固定元件。

② 调节可调元件法。在电路中已经装有调整元件,如电位器、微调电容器或微调电感器等。其优点是调节方便,并且电路工作一段时间以后如果状态发生变化,可以随时调整;但可调元件的可靠性差一些,体积通常也比固定元件大。可调元件的参数调整确定以后,必须用胶或黏合漆把调整端固定住。

(6) 各部件调整好之后,把所有的部件及印制电路板全部插上,进行整机调试,检查各部分连接有无影响,以及机械结构对电气性能的影响等。如果调试高频部件,要采取屏蔽措施,防止工业干扰或其他强电磁场的干扰。

(7) 测试整机的消耗电流和功率。

(8) 经过调整和测试,确定并紧固各调整元件。在对整机装调质量进一步检查后,对设备进行全参数测试,各项参数的测试结果均应符合技术文件规定的各项技术指标。

(9) 有些电子设备在调试完成之后,需进行环境试验,以考验在相应环境下正常工作的能力。环境试验包括温度、湿度、气压、振动、冲击和其他环境试验,应严格按技术文件规定执行。

(10) 大多数的电子设备在测试完成之后,均进行整机通电老炼试验,目的是提高电子设备

工作的可靠性。老炼试验应按产品技术条件的规定进行。

(11) 参数复调 经整机通电老炼后, 各项技术性能指标会有一定程度的变化, 通常还需进行参数复调。

#### 17.1.1.4 电子设备的整机检验

在电子设备的生产过程中, 为保证产品的质量, 自始至终都要重视做好检验工作。产品的检验工作一般可分为三个阶段, 即元器件、材料及零部件等入库前的检验; 生产过程中的检验以及整机检验。整机检验是检查产品经过调试之后是否达到了预定的技术指标, 检验产品能否通过规定的各种试验, 达到可靠性指标要求。

整机检验的主要内容是: 对整机主要技术指标进行测试; 对整机性能进行各方面的试验(包括对安全要求进行的试验)。

##### 1. 直观检验

###### (1) 外观检查

检查的主要内容及要求是: 机壳及面板的表面涂覆层及设备应用的各种标志、装饰件, 如型号、名称、生产厂名、商标等是否齐全, 有无损伤; 机器的各种连接装置, 如同轴电缆、接线柱、插头座、插入单元等是否完好, 并符合规定的要求; 机器的各种结构件有无变形、断裂等现象。

###### (2) 使用操作的检查

机器各种控制机构的标志位置、转动方向、数字或字母的标度等, 是否有清晰的标度和量值符号, 散热及通风设备安装是否正确, 使用是否正常等。

##### 2. 主要性能指标的测试

测试机器的性能指标, 是整机检验的主要内容之一。通过检验查看机器是否达到了国家技术标准。测试应按照国家颁布的有关技术标准来进行。

##### 3. 电子整机产品的环境试验

电子产品的环境适应性是研究可靠性的主要内容之一。目前, 对于产品的环境适应性研究, 即对于产品的环境条件、环境影响和环境工程方面的探索和试验, 已经发展成为一门新兴的技术科学——环境科学。环境科学研究所涉及的范围非常广泛, 要在产品可能遇到的各种外界因素、影响规律以及如何从产品的设计、制造和使用等各个环节的研究中, 改进和提高产品的环境适应能力; 并且研究相应的试验技术、试验设备、测量方法和测量仪表。对于从事电子产品电路设计、结构设计及制造工艺的技术人员来说, 必须对与环境条件有关的知识有全面的了解, 以便采取相应的措施来提高产品的质量水平。

###### (1) 电子产品的环境要求

电子产品的应用领域十分广泛, 储存、运输、工作过程中所处的环境条件是复杂而多变的, 除了自然环境以外, 影响产品的因素还包括气候、机械、辐射、生物和人员条件。制订产品的环境要求, 必须以它实际可能遇到的各种环境及工作条件作为依据。例如, 温度、湿度的要求由产品使用地区的气候、季节情况决定; 振动、冲击等方面的要求与产品可能承受的机械强度及运输条件有关; 还要考虑有无化学气体、盐雾、灰尘等特殊要求。

对于一般电子整机产品来说, 降低环境要求, 将使它难于适应更多的用户和环境的变化; 过高地提出环境要求, 必将使产品的制造成本大大增加。

###### (2) 环境试验的内容

###### ① 绝缘电阻和耐压的测试。根据产品的技术条件, 一般在仪器有绝缘要求的外部端口(电源

插头或接线柱)和机壳之间、与机壳绝缘的内部电路和机壳之间、内部互相绝缘的电路之间,进行绝缘电阻和耐压的测试。测试绝缘电阻时,同时对被测部位施加一定的测试电压(选择 500V、1 000V 或 2 500V)达一分钟以上。

进行耐压试验,试验电压要在 5~10s 内逐渐增加到规定值(选择 1kV、3kV 或 10kV),保持一分钟,应该没有表面飞弧、扫掠放电、电晕和击穿现象。

② 对供电电源适应能力的试验。一般,要求输入交流电网的电压在  $220\text{V} \pm 10\%$  和频率在  $50\text{Hz} \pm 4\text{Hz}$  之内,仪器仍能正常工作。

③ 温度试验。把仪器放入温度试验箱,进行额定使用范围上限温度试验、额定使用范围下限温度试验、储存运输条件上限温度试验和储存运输条件下限温度试验。图 17-2 是温度、湿度试验箱(俗称“潮热箱”)的照片,用这种设备不仅能做温度实验,还能做湿度实验。



图 17-2 温度、湿度试验箱

④ 湿度试验。把仪器放入湿度试验箱,在规定的温度下通入水气,进行额定使用范围和储存运输条件下的潮湿试验。

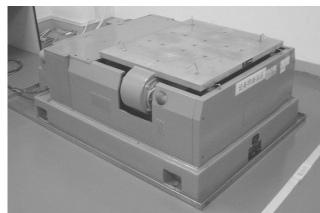


图 17-3 振动实验台

⑤ 振动和冲击试验。把仪器紧固在专门的振动台和冲击台上进行单一频率振动试验、可变频率振动试验和冲击试验。试验有三个参数:振幅、频率和时间。图 17-3 是振动实验台的照片。

⑥ 运输试验。把仪器捆绑在载重汽车的拖车上行车 20km 进行试验,也可以在 4Hz、3g 的振动台上进行 2h 的模拟试验。

### (3) 整机例行试验程序

环境试验也称例行试验,它可以分现场试验、人工模拟试验和天然暴露试验。生产厂家通常都采用人工模拟试验。在产品研制的特定阶段,应进行规定的试验项目。定型样机应进行全部项目试验及进行全部工作特性测试。在产品投产后的例行试验中,每项试验可进行主要工作特性测试。批量生产的产品,生产间断时间大于 6 个月时,每批都应进行例行试验。连续生产的产品,每年进行一次试验。改变主要设计、工艺、元器件及材料时,都要进行例行试验。

整机例行试验程序一般如下:

① 抽样。进行试验的机器应从试验合格的样品中,根据规定比例随机抽取,其数量应不少于 2 台。在产品质量不稳定时,质检部门有权随时抽取样机进行试验。

② 试验前的预处理。包括机械结构性能检查、抗电强度和绝缘性能检查、电气性能按指标测量等。

③ 试验顺序。气候试验顺序:高温负荷、高温储存、恒定湿热、低温负荷、低温储存。机械试验顺序:振动、冲击、运输、跌落。以上每道环境试验后,经一定时间恢复,按规定技术条件测量性能指标。试验中,受试验的整机如果出现故障,应及时分析处理,一般还应加倍抽样试验,如果仍出现同样故障,则停止环境试验,待采取措施解决后,再继续试验。

④ 整理试验数据。将试验中记录的数进行整理,并写出环境试验报告。

#### 17.1.1.5 电子整机产品的老化

为保证电子整机产品的生产质量,通常在装配、调试、检验完成之后,还要进行整机的通电老化。同时,为了认证产品的设计质量、材料质量和生产过程质量,需要定期对产品进行环境试

验。虽然这两者都属于质量试验的范畴，但它们有如下几点区别：

(1) 老化通常是在一般使用条件（如室温）下进行；环境试验却要在模拟的环境极限条件下进行。所以，老化属于非破坏性试验，而环境试验往往使受试产品受到损伤。

(2) 通常每一件产品在出厂以前都要经过老化；而环境试验只对少量产品进行试验，例如，新产品通过设计鉴定或生产鉴定时要对样机进行环境试验，当生产过程（工艺、设备、材料、条件）发生较大改变、需要对生产技术和管理制度进行检查评判、同类产品进行质量评比的时候，都应该对随机抽样的产品进行环境试验。

(3) 老化是企业的常规工序；而环境试验一般要委托具有权威性的质量认证部门、使用专门的设备才能进行，需要对试验结果出具证明文件。

#### 1. 整机产品老化条件的确定

电子整机产品的老化，全部在接通电源的情况下进行。老化的主要条件是时间和温度，根据不同情况，通常可以在室温下选择 8h、24h、48h、72h 或 168h 的连续老化时间；有时采取提高室内温度（密封老化室，让产品自身的工作热量不容易散发，或者增加电热器）甚至把产品放入恒温的试验箱的办法，缩短老化时间。

在老化时，应该密切注意产品的工作状态，如果发现个别产品出现异常情况，要立即使它退出通电老化。

#### 2. 静态老化和动态老化

在老化电子整机产品的时候，如果只接通电源、没有给产品注入信号，这种状态叫做静态老化；如果同时还向产品输入工作信号，就叫做动态老化。以电视机为例，静态老化时显像管上只有光栅；而动态老化时从天线输入端送入信号，屏幕上显示图像，扬声器里发出声音。又如，计算机在静态老化时只接通电源，不运行程序；而动态老化时要持续运行测试程序。显而易见，动态老化比较静态老化，是更为有效的老化方法。

## 17.1.2 调试仪器及其使用

### 17.1.2.1 仪器类型及其发展现状

#### 1. 常用调试仪器

电子测量仪器按其工作原理与用途，大致划为以下几类。

##### (1) 万用表

万用表具有用途多、量程广、使用方便等优点，是电子测量中最常用的工具。它可以用来测量电阻、交流电压和直流电压。有的万用表还可以测量晶体管的主要参数及电容器的电容量等。常见的万用表有指针式万用表和数字式万用表。

万用表的表头为磁电系测量机构，它只能通过直流，利用二极管将交流变为直流，从而实现交流电的测量。在电流接法的基础上，加上电池、分流电阻和波段开关，就构成了一个欧姆表。

##### (2) 示波器

示波器是一种测量电压波形的电子仪器，它可以把被测电压信号随时间变化的规律，用图形显示出来。使用示波器不仅可以直观而形象地观察被测物理量的变化全貌，而且可以通过它显示的波形，测量电压和电流，进行频率和相位的比较，以及描绘特性曲线等。

##### (3) 信号发生器

信号发生器（包括函数发生器）为检修、调试电子设备和仪器时提供信号源。它是一种能够

产生一定波形、频率和幅度的振荡器。例如,产生正弦波、方波、三角波、斜波和矩形脉冲波等。

#### (4) 晶体管特性图示仪

晶体管特性图示仪是一种专用示波器,它能直接观察各种晶体管特性曲线。例如,晶体管共射、共基和共集三种接法的输入、输出特性及反馈特性;二极管的正向、反向特性;稳压管的稳压或齐纳特性;它可以测量晶体管的击穿电压、饱和电流、 $\beta$ 或 $\alpha$ 参数等。

#### (5) 兆欧表

兆欧表(俗称摇表)是一种检查电气设备、测量高电阻的简便直读式仪表,通常用来测量电路、电机绕组、电缆等的绝缘电阻。兆欧表大多采用手摇发电机供电,故称摇表。由于它的刻度是以兆欧(M $\Omega$ )为单位,故称兆欧表。

#### (6) 红外测试仪

红外测试仪是一种非接触式测温仪器,它包括光学系统和电子线路,在将信息进行调制、线性化处理后达到指示、显示及控制的目的。目前已应用的红外测温仪有光子测温和热测温仪两种,主要用于电热炉、农作物、铁路钢轨、深埋地下超高压电缆接头、消防、气体分析、激光接收等温度测量及控制场合。

#### (7) 集成电路测试仪

该类仪器可对 TTL、PMOS、CMOS 数字集成电路功能和参数测试,还可判断抹去字的芯片型号及对集成电路在线功能测试、在线状态测试。

#### (8) LCR 参数测试仪

电感、电容、电阻参数测量仪,不仅能自动判断元件性质,而且能将符号图形显示出来,并显示出其参数值。还能用它测量  $Q$ 、 $D$ 、 $Z$ 、 $L_p$ 、 $L_s$ 、 $C_p$ 、 $C_s$ 、 $K_p$ 、 $K_s$  等参数,且显示出等效电路图形。

#### (9) 频谱分析仪

频谱分析仪在频域信号分析、测试、研究、维修中有着广泛的应用。它能同时测量信号的幅度及频率,测试比较多路信号及分析信号的组成。还可测试手机逻辑和射频电路的信号。例如,逻辑电路的控制信号、基带信号,射频电路的本振信号、中频信号、发射信号等。

除以上常用的电子测量仪器外,还有时间测量仪、电桥、相位计、动态分析器、光学测量仪、应变仪、流量仪等。

### 2. 调试仪器的发展现状

#### (1) 仪器性能更加优异

现今,在电子技术尤其是微电子技术和信息技术的推动下,电子设备测量调试仪器的性能更加优异,测量功能更加强大,仪器的测量精度、测试灵敏度、测量的动态范围等都达到了前所未有的高度。例如,Agilent 公司的 PSA 频谱分析仪的测量灵敏度高达-169dBm(接近物理界热噪声-174dBm),PNA 网络分析仪的动态范围高达 143dB,Agilent83453A 高分辨率分光计分辨带宽=0.000 1nm(亚皮米)(突破皮米分辨带宽的壁垒),Agilent86107A 精密时基参考模块,对小于 100ns 的时延,抖动为 1.7psRMS(突破皮秒抖动瓶颈),DSO80000 系列的示波器,其单一 A/D 芯片具有 20GSa/s 实时高采样率,使之成为世界上采样率最快的示波器(40GSa/s 实时采样率,13GHz 带宽)。另外,更多强大的测量功能被赋予单台仪表中,如 Agilent 公司的 8960 系列无线综合测试仪(集移动手机和基站的射频测试与协议测试于一身);ESG/PSG 矢量信号源可以灵活产生包括连续波/调幅/调频/调相/脉冲调制、全制式通信协议、任意波形及用于今后的其他信号;MSO 混合信号示波器(2/4 个模拟测量通道+16 个逻辑分析通道)使单台仪器同时具备示波器和逻辑分析仪的功能;Infiniium 示波器内装 VSA 矢量信号分析软件后

也成为世界上测量分析带宽最宽的矢量信号分析仪。

### (2) 仪器与计算机融为一体

仪器和计算机技术的前所未有的融合。首先,越来越多的仪器选用以 Windows 软件和 Intel 芯片为平台,采用 Windows GUI 和基于军用标准的软件,用 Windows 软件代替仪器内部操作软件,并易于与 MS 办公室应用软件连接,充分发挥其效能,如 Agilent 公司的仪器可用 Word 语言捕获屏幕图像,用 Excel 语言绘制波形数据,用 Excel 语言捕获测量数据,易于自由地从互联网下载和升级最新的软件版本,利用 Windows Help 提高了仪器操作学习的方便性;同时,触摸屏被广泛利用,语音控制可解决双手同时被占用时操作仪器的问题,通过网络控制仪器操作,并用基于 MSWindows 和 MSVisual Studio 实现测试自动化;另外,仪器内部的 VBA 软件可有效地帮助实现生产过程中的测试自动化。

其次,由于计算机技术被大量应用到仪器之中,使得仪器具备了更加先进的连通性,如 Agilent 公司的仪器大都采用了 USB 接口、LAN 接口、GPIB 接口。同时,也安装了标准光标指示器(鼠标、跟踪球、触摸键、操纵杆等)和其他部件(键盘、CDRW 驱动器、直接连接打印机的并行接口,用于外部监视器的 VGA 输出,内部硬盘驱动器等)。值得一提的是,在军工等特殊行业,测试数据的安全性和保密性要求格外重要,为此,Agilent 公司在仪器上设计了可卸出的硬盘(如 PNA 矢量网络分析仪和 Infiniium 示波器),使工作人员在实验室完成测试任务后,卸出硬盘,单独运输仪器至测试现场(如战地),由操作人员取出随身携带的硬盘装入仪器,再进行现场测量,从而保证了数据的安全性和保密性。

### (3) 测试及仿真软件在仪器中广泛应用

随着计算机的运算速度和处理数据能力的不断增加,及计算机仿真技术的广泛应用,仪器的硬件和测试软件及仿真软件的结合越来越紧密。首先,硬件的模块化设计,使得通过不同的硬件模块组合配以不同的软件,从而形成不同功能的仪器和不同的测试解决方案,如 Agilent 公司的 DAC-J 宽带示波器 86100C,通过插入不同的模块并配以不同软件,该仪器可成为抖动分析仪,宽带示波器,数字通信分析仪,时域反射分析仪;此外,VXI 结构的测试仪器更加充分地解释了模块化结构仪器的灵活配置和应用。

其次,软件无线电的概念已有了全新的解释和现实的应用,Agilent 公司的 89601A 矢量分析软件是实现这一理念的最好例证。它利用计算机强大的数学运算和数据处理能力将大量的数字信号处理功能和数据分析功能充分展现在计算机软件之中,通过与不同的数据采集前端(如 VXI 结构的矢量信号分析仪,频谱分析仪,Infiniium 数字示波器)相结合,组合出不同功能的矢量信号分析仪。

## 17.1.2.2 调试仪器的选择和配置

### 1. 调试仪器的选择原则

在调试工作中,调试质量的好坏,在某种程度上,取决于测试仪器的正确选择与使用。为此,在选择仪器时,应掌握以下原则:

(1) 测量仪器的工作误差应远小于被调试参数所要求的误差。在调试工作中,通常要求调试中产生的误差,相对于被测参数的误差来说,可以忽略不计。在调试中所产生的误差,除调试仪器的工作误差外,还要考虑测试方法及测试系统的误差,但后者在制定测试方案时,就已经考虑到,并采取措加以消除,故该误差可以忽略不计。

(2) 仪器的测量范围和灵敏度,应符合被测电量的数值范围。例如,选用测量用信号源,若工作频率较低,可选用低频信号发生器,输出信号幅度为几十毫伏至几伏;若工作频率较高,



可选用高频信号发生器。当然,在选择信号源时,信号输出方式、输出阻抗等指标也要满足要求。

(3) 调试仪器量程的选择,应满足测量精度的要求。如指针式仪表,被测量值越接近满度值误差就越小。如果选用数字式仪表,其测量误差一般多发生在最后一位数字上。所以,测量量程的选择,应使其测量值的有效数字位数尽量等于所指示的数字位数。

(4) 测试仪器输入阻抗的选择,要求在接入被测电路后,应不改变被测电路的工作状态,或者接入电路后所产生的测量误差,在允许范围之内。例如,在测电压时,仪表并连接入被测电路两端,应选择输入阻抗高或电压灵敏度高的电压表,这对小电流、高阻抗电路尤为重要。在测电流时,仪表串连接入电路之中,所以应选内阻很小的电表,这对低电压、大电流电路尤为重要。在超高频测量时,应注意测试仪表的输入阻抗和被测电路阻抗相匹配,以免在连接处产生终端反射而造成波形畸变。

(5) 测试仪器的测量频率范围(或频率响应),应符合被测电量的频率范围(或频率响应)。否则会因波形畸变而产生测量误差。

## 2. 调试仪器的配置

### (1) 测试现场布置和接线

一般通用电子测量仪器,都只具有一种或几种功能,要完成某一产品的测试工作,往往需要多台测试仪器及辅助设备、附件等组成一个测试摊位或测试系统。一项测试究竟要由哪些型号的仪器及设备组成,这要由测试方案来确定。测试方案定了以后,为了保证仪器的正常工作和一定的精度,在现场布置和接线方面需要注意以下几个问题:

① 各种仪器的布置应便于观测。观察波形或读取测试结果(数据)不易疲劳,如指针式仪器不宜放得太高或太偏。

② 仪器的布置应便于操作,即应根据不同仪器面板上可调旋钮的布置情况来安排其位置,使调节方便舒适。例如,对需要调节谐振或平衡状态的仪器,应便于操作者用右手肘部支撑桌面,以达到调节灵活的目的。

③ 仪器重叠放置时,应注意安全稳定,把体积小、重量轻的放在上面。有的仪器把大功率晶体管安装在机壳外面,重叠时应注意不要造成短路。对于功率大、发热量多的仪器,要注意仪器的散热和对周围仪器的影响。

④ 仪器的布置要力求接线最短。对高增益、弱信号或高频参数的测量,应特别注意不要将被测件的输入与输出接线靠近,以免引起信号的串扰及寄生振荡。

### (2) 对调试人员的要求

为使生产过程形成的电子产品的各项性能参数满足要求并具有良好的可靠性,调试工作是很重要的。在相同的设计水平与装配工艺的前提下,调试质量就取决于调试工艺是否制订得正确和操作人员对调试工艺的掌握程度。对调试人员的要求如下:

① 懂得被调试产品的各个部件和整机的电路工作原理,了解它的性能指标要求和使用条件。

② 正确、合理地选择测试仪表,熟练掌握这些仪表的性能指标和使用环境要求。在调试之前,必须对此有深入的了解和认识。有关仪器的工作特性、使用条件、选择原则、误差的概念和测量范围、灵敏度、量程、阻抗匹配、频率响应等知识,是电子工程技术人员应当掌握的基本理论。

③ 学会测试方法和数据处理方法。近年来,编制测试软件对数字电路产品进行智能化测试、采用图形或波形显示仪器对模拟电路产品进行直观化测试的技术都得到了迅速的发展,这是测试方法和数据处理方法新的知识领域。

④ 熟悉调试过程中对于故障的查找和消除方法。

- ⑤ 合理地组织安排调试工序，并严格遵守安全操作规程。

## 17.2 电子设备调试检验技术

### 17.2.1 电气调试的一般方法

#### 17.2.1.1 调试中的干扰及其抑制

在电子技术中，一般把来自设备系统外部的无用信号称作干扰，而把由设备或系统内部产生的无用信号称作噪声。这些无用信号在测试过程中，以不同形式对有用信号产生干扰。在正常情况下，使用的测试仪器都是经过计量合格的仪器，其内部噪声产生的影响，可以忽略不计。因此，测试过程中所受影响主要是来自外部的各种干扰。这些干扰影响主要表现为仪器读数显著地偏大或偏小、读数不稳、随机跳动，严重时甚至使仪器不能正常工作，以致损坏仪器。

为了消除或减小测试中的系统误差，提高测量的精度，可采用如下一些行之有效的测量方法。

(1) 零示法 此法广泛应用在阻抗测量（各种电桥）、电压测量（电位差计及数字式电压表）、频率测量（相频法、李沙育图形法等）及其他许多参量的测量中。

(2) 替代法 又称置换法，它是用一个标准可调的已知量去代替测量装置中原来的待测参量，调节该标准已知量的大小，使测量装置的指示器读数不变，这时，待测参量值就等于该标准已知量，测量装置及指示器的误差不会影响测量结果。测量的精度主要取决于标准已知量的精度及指示器的灵敏度。在阻抗、高频电压、频率、衰减等测量中都得到广泛的应用。

(3) 补偿法 又称部分替代法。其原理与替代法相似，只不过是部分地而不是全部地去代替被测量。这种方法在高频阻抗、电压、衰减等测量及计量中应用很广。

(4) 对照法 又称交换法，适于在对称的测量装置中，用来检查其对称性是否良好。

#### 17.2.1.2 电路调试要点

##### (1) 电路分块隔离，先直流后交流

在比较复杂的电子产品中，整机电路通常可以分成若干个功能模块，相对独立地完成某个特定的电气功能；其中每一个功能模块，往往又可以进一步细分为几个具体电路。细分的界限，对于分立元件电路来说，是以某一、两只半导体三极管为核心的电路；对于集成电路来说，是以某个集成电路芯片为核心的电路。例如，一台分立元件的黑白电视机，可以分成高频调谐、中放通道、视频放大、同步分离、自动增益控制（AGC）、行扫描、场扫描、伴音及电源等几个功能电路模块；对于行扫描电路来说，还可以进一步细分为鉴相器（AFC）、行振荡、行激励、行输出及高压整流电路。在这几个电路中，都有一、两只三极管作为核心器件。

所谓“电路分块隔离”，是在调试电路的时候，对各个功能电路模块分别加电，逐块调试。这样做，可以避免模块之间电信号的相互干扰；当电路工作不正常时，大大缩小了搜寻原因的范围。实际上，有经验的设计者在设计电路时，往往都为各个电路模块设置了一定的隔离元件，例如电源插座、跨接导线或接通电路的某一电阻。当电路调试时，除了正在调试的电路，其他各部分都被隔离元件断开而不工作，因此不会产生相互干扰和影响。当每个电路模块都调试完毕以后，再接通各个隔离元件，使整个电路进入工作状态。对于那些没有设置隔离元件的电路，可以在装配的同时逐级调试，调好一级以后再装配下一级。

直流工作状态是一切电路的工作基础。直流工作点不正常,电路就无法实现其特定的电气功能。所以,在成熟的电子产品原理图上,一般都标注了它们的直流工作点——晶体管各极的直流电位或工作电流、集成电路各引脚的工作电压,作为电路调试的参考依据。应该注意,由于元器件的数值都具有一定偏差,并因所用仪表内阻和读数精度的影响,可能会出现测试数据与图标的直流工作点不完全相同的情况,但是一般说来,它们之间的差值不应该很大,相对误差不应该超出 $\pm 10\%$ 。当直流工作状态调试完成之后,再进行交流通路的调试,检查并调整有关的元件,使电路完成其预定的电气功能。这种方法就是“先直流后交流”,也叫做“先静态后动态”。

### (2) 注意人机安全,正确使用仪器

在电路调试时,由于可能接触到危险的高电压,要特别注意人机安全,采取必要的防护措施。例如,在电脑显示器(彩色电视机)中,行扫描电路输出级的阳极电压高达 20kV 以上,调试时稍有不慎,就很容易触碰到高压线路而受到电击。特别是高压开关电源没有电源变压器的隔离,220V 交流电的火线可能直接与整机底板相通,如果通电调试电路,很可能造成触电事故。为避免这种危险,在调试、维修这些设备时,应该首先检查底板是否带电。必要时,可以在电气设备与电源之间使用变比为 1:1 的隔离变压器。

正确使用仪器,包含两方面的内容:一方面,能够保障人机安全,否则不仅可能发生如上所说的触电事故,还可能损坏仪器设备。例如,初学者错用了万用表的电阻挡或电流挡去测量电压,使万用表被烧毁的事故是常见的。另一方面,正确使用仪器,才能保证正确的调试结果,否则,错误的接入方式或读数方法会使调机陷入困境。例如,当示波器接入电路时,为了不影响电路的幅频特性,不要用塑料导线或电缆线直接从电路引向示波器的输入端,而应当采用衰减探头;在测量小信号的波形时,要注意示波器的接地线不要靠近大功率器件,否则波形可能出现干扰。又如,在使用频率特性测试仪(扫频仪)测量检波器、鉴频器,或者当电路的测试点位于三极管的发射极时,由于这些电路本身已经具有检波作用,就不能使用检波探头,而在测量其他电路时均应使用检波探头;扫频仪的输出阻抗一般为  $75\Omega$ ,如果直接接入电路,会短路高阻负载,因此在信号测试点需要接入隔离电阻或电容;仪器的输出信号幅度不宜太大,否则将使被测电路的某些元器件处于非线性工作状态,造成特性曲线失真。

#### 17.2.1.3 静态工作点的调整

各级电路的调整,首先是各级直流工作状态(静态)的调整,测量各级直流工作点是否符合设计要求。检查静态工作点也是分析判断电路故障的一种常用方法。

测量静态工作点就是测量各级直流工作电压和电流。由于测量电流时,要将电流表串入电路中,需要改动电路板的连接,很不方便。而测量电压,只要将电压表并联在电路两端就行了。所以一般静态工作点的测量,都是测量直流电压,若需知道直流电流的大小,可根据阻值的大小计算出来。也有些电路根据测试需要,在电印制板上留有测试用的中断点,待串入电流表测量出电流数值后,再用焊锡连接好。

##### (1) 晶体管静态工作点的调整

调整晶体管的静态工作点就是调整它的偏置电阻,使它的集电极电流达到电路设计要求的数值。调整是从最后一级开始,逐级往前进行。各级调整完毕后,接通所有各级的集电极电流检测点,即可用电流表检查整机静态电流。

##### (2) 集成电路静态的调整

由于集成电路本身的结构特点,其“静态工作点”与晶体管不同,集成电路能否正常工作,

一般看其各引脚对地电压是否正确。但有时还需对整个集成块的功耗进行测试,除能判断它能否正常工作外,还能避免可能造成电路元器件的损坏。测试的方法是将电流表接入供电电路中,测量电流值,计算出耗散功率,如集成块用正负电源供电,则应分别进行测量,得出总的耗散功率。

对于数字集成电路往往还要测量其输出电平的大小,来判断其性能的好坏。接下来逐渐安装其他模块,每安装好一个模块,就上电测试一下,上电时也是按照上面的步骤,以避免因为设计错误或安装错误而导致过流而烧坏元件。

#### 17.2.1.4 动态特性测试

##### 1. 波形的测试

波形的观测是电子设备调试工作的一项重要内容。各种整机电路中都有波形的产生、变换和传输电路。通过对波形的观测来判断电路工作是否正常,已成为测试与维修中的一种主要方法。观察波形使用的仪器是示波器,通常观测的波形是电压波形,有时为了观察电流波形,采用电阻变换成电压或使用电流探头。

利用示波器进行调试的基本方法,是通过观测各级电路的输入端和输出端或某些点的信号波形,来判定各级电路的工作是否正常。若电路对信号变换处理不符合设计要求,则说明电路某些参数不对,或电路出现某些故障。应根据机器和具体情况,逐级或逐点进行调整,使其符合预定的设计要求。需要注意的是,电路在调整过程中相互是有影响的。这就需要反复调整,使之达到最佳状态。

示波器不仅可以观察各种波形,而且可以测试波形的各项参数,例如幅度、周期、频率、相位、脉冲信号的前后沿时间、脉冲宽度等。

##### 2. 频率特性的测量

在分析电路的工作特性时,经常需要了解网络在某一频率范围内,其输出与输入之间的关系。当输入电压幅度恒定时,输出电压随频率而变化的特性,称之为网络幅度-频率特性,即通常所说的频率特性。

频率特性的测量,是整机测试中的一项重要内容。频率特性的测量,一般有两种方法:一是点频法(又称插点法),二是扫频法。

(1) 点频法 测试时需保持输入电压不变,逐点改变信号发生器的频率,并记录各点对应的输出幅度的数值。在直角坐标平面描绘出的幅度-频率曲线,就是被测网络的频率特性。点频法的优点是准确度高,缺点是烦琐、费时,可能因频率间隔不够密,而漏掉被测频率中的某些细节。

(2) 扫频法 扫频法是利用扫频信号发生器来实现频率特性的自动或半自动测试的。因为发生器的输出频率是连续扫描的,因此,扫频法简捷、快速,而且不会漏掉被测频率特性的细节。但是,用扫频法测出的动态特性不够准确。用扫频法测频率特性的仪器是“频率特性扫频仪”,简称扫频仪。

##### 3. 瞬态过程的观测

在分析和调整电路时,为了观测脉冲信号通过电路后的畸变,有时会感到应用测量其特性的方法有些烦琐、不够直观。而采用观测电路的过渡特性(瞬态过程),则比较直观,而且能直接观察到输出信号的形状,适合于电路调整。

#### 17.2.1.5 整机性能的测试

##### 1. 整机调试工艺要求

(1) 整机调试工作应在屏蔽室或屏蔽箱内进行,尤其是与高频有关的项目,以防外界信号

的干扰及设备对其他机器的干扰,保证产品在调试过程中性能指标的一致性。

(2) 测试仪表应定期进行计量、校准,以保持仪表正常的工作性能和精度。

(3) 调试现场应保持整齐、清洁,调试需用的工装设备(例如大批量生产时需要制做的专用调试模板等)应按工艺要求严格制作,调试大型设备的高压部分时,应按要求做好安全防护工作。

(4) 调试人员应按工艺操作规程做好个人准备,以使调试工作顺利进行,并保证调试工作中的安全。

## 2. 整机工作特性调试

整机调试,是指经过初调的各单元电路板及有关机电元件、结构件,装联成整机后的调整与测试。通过整机调试应达到规定的各项技术指标。整机调试过程是一个有序的过程,一般来说,先调结构部分,后调电气部分。电气指标应先调基本的或独立的项目,后调影响大的项目。

整机调试的具体内容和方法步骤,主要取决于电路构成和性能指标,同时也取决于生产工艺技术。因此不同类型或不同等级的机器,它们的调试工艺是不同的。加之整机工作特性所包含的各种电量的性质和要求也不相同,所以不可能有适应各种电子设备的整机调试的方法步骤。

## 3. 家电产品的功能检测

目前,绝大多数家电产品的电路均以单片机为核心,整机的功能基本体现在单片机及其控制程序上。在家电产品设计开发时,对其功能和性能会由设计开发部门编制“产品技术规格书”,这一规格书类似于“产品标准”,主要内容是将产品技术指标及软件的控制功能写入其中。在大批量生产家电的电子控制器时,产品功能和性能的检测就是以“技术规格书”为依据进行的。

以单片机为控制核心的家电控制器,其控制电路以数字电路为主,因而其测试也以数字电路测试为主。数字电路只有两种状态:“通”和“断”,如果用灯光、声音、电动机等来模拟整机工作,均可表示其功能的正确和错误。在实际检测中,用灯光、蜂鸣音、电动机等的显示和工作作为判断这些产品正常与否的测试手段。

电子产品的检测,以单元电路板的检测为基础;对整机产品的检测,主要集中在对控制电路板的检测上。因此,这里以介绍电路板的检测为主。

在大批量生产时,不可能将每块电路板安装到整机上进行测试。因而实际生产中,工艺部门会设计制造一种测试工装(或叫测试架)来模拟整机。测试工装的设计原理是用一个测试针床模拟整机与电路板相连。工装上将电路板上的电源、地线、输入线和输出线接到针床的弹性测试针上,再用一些开关控制工装上的输入信号和电源,输出用指示灯、蜂鸣器或电机模拟整机上的相应输出负载。当将被测试电路板(卡)压到测试工装上时,工装上的“输入端”、“输出端”、“电源端”及“地端”接到电路板上,电路板就可以正常工作了。扳动工装上的开关或启动测试程序,电路板即可按其控制功能输出相应的信号给工装上的输出负载。测试人员就可根据输出的信号判断电路板工作是否正常。绝大多数电子产品生产企业都是用这种方法对产品进行模拟测试的。

归结起来,电子产品的功能、性能检测程序大体上是:确定检测方案;设计和制作工装及确定模拟输入信号和输出负载;编制检测岗位的作业指导书,确定操作步骤和方法,培训检测人员。作业指导书应尽量将软件功能检测完全。有些测试工装安装有模拟检测软件,能快速完整地检测到产品的所有功能和性能。

### 17.2.1.6 调试中查找和排除故障

在生产过程中,直接通过装配调试一次合格的产品在批量生产中所占的比率,称为“直通率”。直通率是考核产品设计、生产、工艺、管理质量的重要指标。在整机生产装配的过程中,经过层

层检查、严格把关，可以大大减少在整机调试中出现故障。尽管如此，产品装配好以后，往往还不全是一通电就能正常工作的，由于元器件和工艺等原因，会遗留一些有待调试中排除的故障。另外，测试仪表在调试工作中发生故障的情况也是屡见不鲜的。

必须强调指出，在整个生产过程中，如果没有在前道工序（指辅助加工、部件装配与调试）中加以严格控制，未能使局部电路或局部结构的故障得到解决，或者留下隐患，那么，在总装后必将导致故障层出不穷，非但影响生产进度，也会降低产品质量。这不仅是技术问题，从根本上说，还是管理问题。

纵然如此，电子产品在生产过程中出现故障仍是不可避免的，检修必将成为调试工作的一部分。如果掌握了一定的检修方法，就可以较快地找到产生故障的原因，使检修过程大大缩短。当然，检修工作主要是靠实践。一个具有相当电路理论知识、积累了丰富经验的调试人员，往往不需要经过死板、烦琐的检查过程，就能根据现象很快判断出故障的大致部位和原因。而对于一个缺乏理论水平和实践经验的人来说，若再不掌握一定的检修方法，则会感到如同大海捞针，不知从何入手。因此，研究和掌握一些故障的查找程序和排除方法，是十分有益的。

电子产品的故障有两类：一类是刚刚装配好而尚未通电调试的故障；另一类是正常工作过一段时期后出现的故障。它们在检修方法上略有不同，但其基本原则是一样的。所以这里对这两类故障就不作区分。另外，由于电子产品的种类、型号和电路结构各不相同，故障现象又多种多样，因此，这里只能介绍一般性的检修程序和基本的检修方法。

### 1. 引起故障的原因

总体说来，电子产品的故障不外是由于元器件、线路和装配工艺三方面的因素引起的。常见的故障大致有如下几种：

- （1）焊接工艺不善，虚焊造成焊点接触不良。
- （2）由于空气潮湿，导致元器件受潮、发霉，或绝缘降低甚至损坏。
- （3）元器件筛选检查不严格或由于使用不当、超负荷而失效。
- （4）开关或接插件接触不良。
- （5）可调元件的调整端接触不良，造成开路或噪声增加。
- （6）连接导线接错、漏焊或由于机械损伤、化学腐蚀而断路。

（7）由于电路板排布不当，元器件相碰而短路；焊接连接导线时剥皮过多或因热后缩，与其他元器件或机壳相碰引起短路。

- （8）因为某些原因造成产品原先调谐好的电路严重失调。

（9）电路设计不善，允许元器件参数的变动范围过窄，以至元器件的参数稍有变化，电路就不能正常工作。

- （10）用橡胶或塑料材料制造的结构部件老化引起元件损坏。

以上列举的都是电子产品的一些常见故障。也就是说，这些是电子产品的薄弱环节，是查找故障时的重点怀疑对象。但是，电子产品的任何部分发生故障都会导致整机不能正常工作。应该按照一定的程序，采取逐步缩小范围的方法，根据电路原理进行分段检测，使故障局限在某一部分（部件→单元→具体电路）之中再进行详细的查测，最后加以排除。

### 2. 排除故障的一般程序

- （1）了解故障情况

设备出现故障之后，第一步就是要进行初检，并做好记录。

- （2）检查和分析故障

主要任务是查找出故障的部位和原因,这是排除故障的关键步骤。对电子设备故障进行诊断测试时,一般首先测量干扰发射,因为干扰发射的试验费用一般比敏感度试验费用低。另外,当设备的干扰发射能够满足要求时,往往敏感度也不会有大的问题。因为几乎所有的解决干扰发射的措施同样对改善敏感度有效。

测量干扰发射时,要先测量传导发射,不仅要在标准规定的频率范围内测量,还要对更高的频率进行摸底测量。当电源线上有较强的干扰电流时,要先解决这个问题。因为这些传导干扰电流会借助导线的天线作用产生辐射,导致辐射发射不合格。

当传导发射完全合格后,再进行辐射发射测试。对于辐射发射不合格的频率,要记录下精确频率,便于在用近场探头查找问题时,将频谱分析仪的扫描范围设置在干扰频率附近。

### (3) 处理故障

对于查明的简单故障,如虚焊、导线断头等,可直接处理,而对有些故障,必须拆卸部件才能进行修复的,必须做好处理前的准备工作:必要的标记或记录、必须用的工具和仪器等。不然的话,拆卸后不能恢复,或恢复出错,造成新的故障。

更换元器件时应使用原型号和原规格,对半导体器件来说,不但型号要一致,色标也要相同,并经过测试。电路中若配对管损坏一只,应按电路要求重新配对。修理中还应注意工艺上的严格要求,对于机械性的故障,如磨损、变形、紧固件松动等,会造成接触不良、机械传动失真。

### (4) 校验

经修理后的设备,其各项技术指标是否符合规定的要求,一般要进行校验才能确定。

### (5) 总结

修理结束应进行总结,即对修理资料进行整理归档,贵重仪器要填写档案。这样不仅可以推荐优质、适用的产品,还可将信息反馈回来,提高产品质量。

## 3. 常用方法

维修设备不仅要有一个科学的逻辑检查程序,还要有一定的方法和手段才能快速查明故障原因,找到故障部位。查找故障的方法很多,这里介绍常用的几种。

### (1) 断电观察法

在不接通电源的情况下,打开产品外壳进行观察。用直观的办法和使用万用表电阻挡检查有无断线、脱焊、短路、接触不良,检查绝缘情况、熔丝通断、变压器好坏、元器件情况等。如果电路中有改动过的地方,还应该判断这部分的元器件和接线是否正确。

查找故障,一般应该首先采用断电(不通电)观察法。因为很多故障的发生往往是由于工艺上的原因,特别是刚装配好还未经过调试的产品或者装配工艺质量很差的产品。而这种故障原因大多数单凭眼睛观察就能发现。盲目地通电检查有时反而会扩大故障范围。

### (2) 通电观察法

只有当采用上述的断电观察法不能发现问题时,才可以采用通电观察法。打开产品外壳,接通电源进行表面观察,这仍属于现象观察的方法。通过观察,有时可以直接发现故障的原因。例如,是否有冒烟、烧断、烧焦、跳火、发热的现象。如遇到这些情况,必须立即切断电源,分析原因,再确定检修部位。如果一时观察不清,可重复开机几次;但每次时间不要长,以免扩大故障。必要时,断开可疑的部位再行试验,看故障是否消除。

### (3) 信号替代法

利用不同的信号源加入待修产品有关单元的输入端,替代整机工作时该级的正常输入信号,以判断各级电路的工作情况是否正常,从而可以迅速确定产生故障的原因和所在单元。检测的次

序是,从产品的输出端单元电路开始,逐步移向最前面的单元。这种方法适用于各单元电路是开环连接的情况,缺点是需要各种信号源,还必须考虑各级电路之间的阻抗匹配问题。

有时我们也会用更简单的办法,例如,用手握一个镊子,去碰触各级的输入端,看输出端是否有反应,这在音频、视频等放大电路中常使用(但要注意,热底板的电路或者电压高的电路,不能使用此法,否则可能会导致触电)。如果碰前一级没有反应,而碰后一级有反应,则说明问题出在前一级,应重点检查。

#### (4) 信号寻迹法

注入某一频率的信号或利用电台节目、录音磁带以及人体感应信号做信号源,加在被测机器的输入端,用示波器或其他信号寻迹器,依次逐级观察各级电路的输入和输出端电压的波形或幅度,以判断故障的所在,这种方法叫信号寻迹法(也称跟踪法)。

#### (5) 波形观察法

通过示波器观测被检查电路在交流工作状态下各测量点的波形,以判断电路中各元器件是否损坏的方法,称为波形法。用这种方法需要将信号源的标准信号送入被测电路输入端(振荡电路除外),以观察各级波形的变化。这种方法在检查多级放大器的增益下降、波形失真和振荡电路、开关电路时应用很广。

这种方法对某些电路故障的判断(如寄生振荡,寄生调制),虽不能完全确定故障发生在哪一级,但通过波形的观察,对波形参数的分析,至少可以有助于分析出故障产生的原因,以便于确定进一步的检查方法。

#### (6) 电容旁路法

在电路出现寄生振荡或寄生调制的情况下,利用适当容量的电容器,逐级跨接在电路的输入端或输出端上,观察接入电容后对故障现象的影响,可以迅速确定有问题的电路部分。

#### (7) 部件替代法

替代法是利用性能良好的备份器件、部件(或利用同类型正常机器的相同器件、部件)来替代仪器可能产生故障的部分,以确定产生故障的部位的一种方法。如果替代后工作正常了,说明故障就出在这部分。替换的直接目的在于缩小故障范围,不一定一下子就能确定故障的部位,但为进一步确定故障源创造了条件。这种方法检查方便,不需要什么特殊的测量仪器。特别是生产厂家给用户上门维修服务时简便可行。

#### (8) 整机比较法

使用同型优质的产品,与被检修的设备作比较,找出故障的部位,这种方法叫比较法。检修时可将两者对应点进行比较,在比较中发现问题,找出故障所在。也可将有怀疑的器件、部件插到正常设备中去,若工作依然正常,说明这部分没问题。若把正常设备的部件插到有故障的设备中去,故障就排除了,说明故障就出在这一部件上。

比较法同替代法没有原则的区别,只是比较的范围不同,可将二者结合起来使用,这样可以对故障了解更加充分,并可以发现一些其他方法难以发现的故障原因。

#### (9) 分割测试法

当故障电路与其他电路所牵连线路较多,相互影响较大的情况下,可以逐步分割有关的线路(断掉线路之间互相连接的元件或导线的接点,或拔掉印制板的插件等),观察其对故障现象的影响,以发现故障的所在,这种方法叫分割测试法。这种方法对于检查短路、高压、击穿等一类有可能进一步烧坏元件的故障,有一定控制作用,是比较好的一种方法。

#### (10) 测量直流工作点法



根据电路的原理图,测量各点的直流工作电位并判断电路的工作状态是否正常,是检修电子产品的基本方法。

#### (11) 测试电路元件法

把可能引起电路故障的元器件从整机中拆下来,使用测试设备(如万用表、晶体管图示仪、集成电路测试仪、万用电桥等)对其性能进行测量。

#### (12) 变动可调元件法

在检修电子产品时,如果电路中有可调元件,适当调整它们的参数以观测对故障现象的影响。注意,在决定调节这些可调元件的参数以前,一定要对其原来的位置做好记录,以便一旦发现故障原因不是出在这里时,还能恢复到原先的位置上。

#### (13) 测量电压法

首先要确认的是各芯片电源引脚的电压是否正常,其次检查各种参考电压是否正常,另外还有各点的工作电压是否正常等。例如,一般的硅三极管导通时,BE 结电压在 0.7V 左右,而 CE 结电压则在 0.3V 左右或者更小。如果一个三极管的 BE 结电压大于 0.7V(特殊三极管除外,例如达林顿管等),可能就是 BE 结开路。

#### (14) 短路法

使电路在某两个关键点短路(一般对地短接),观察在该点前后故障现象的有无,或对故障电路影响的大小,从而判断故障的部位,这种方法通常称为短路法。例如,在某点短路时,故障现象消失或显著减小,可以说明故障在短路点之前。因为短路使故障电路产生的影响不能再传到下一组或输出端。如果故障现象未消失,就说明故障在短路点之后,移动短路点位置,可以进一步判定故障的部位。这里必须注意:如果将要短接的两点之间存在直流电位差,就不能直接短路,必须用一只电容器跨接在这两点,起交流短路作用。

短路法在检查干扰、噪声、纹波等故障时,比其他方法简便。

#### (15) 加温或冷却法

对于开机一段时间才出现故障或才工作正常的电子产品,说明它含有热稳定性不好的元件。可通过加温或冷却可疑元件,使故障元件通过加温迅速出现故障或通过散热使故障消失。

当然,还有很多其他的寻找故障点的方法,例如看、听、闻、摸等。“看”就是看元件有无明显的机械损坏,例如破裂、烧黑、变形等;“听”就是听工作声音是否正常,例如,一些不该响的东西在响,该响的地方不响或者声音不正常等;“闻”就是检查是否有异味,例如,烧焦的味道、电容电解液的味道等,对于一个有经验的电子维修人员来说,对这些气味是很敏感的;“摸”就是用手去试探器件的温度是否正常,例如太热,或者太凉,则说明不正常,因为一些功率器件,工作起来时会发热,如果摸上去是凉的,则基本上可以判断它没有工作起来。但如果不该热的地方热了或者该热的地方太热了,那也是不行的。一般的功率三极管、稳压芯片等,工作在 70℃ 以下是完全没问题的。70℃ 大概是一个怎样的概念呢?如果将手压上去,可以坚持 3s 以上,就说明温度大概在 70℃ 以下(注意要先试探性地摸,千万别把手烫伤了)。

### 17.2.1.7 调试的安全措施

在调试过程中,要接触到各种电源以及可能遇到高压电路、高压大容量电容器等,为保护调试人员的人身安全和避免测试仪器和元器件的损坏,必须严格遵守安全操作规程,并注意以下各项安全措施。

#### (1) 周围环境的安全

测试场所除注意整洁外,室内要保持适当的温、湿度,场地内外,不应有激烈的振动和很强的

电磁干扰,测试台及部分工作场地必须铺设绝缘橡胶垫。在调试大型设备的高压部分时,应在其周围铺设合乎规定的地板或绝缘胶垫,并将场地用拉网围好,必要时可加“高压危险”警告牌。工作场地必须有消防设备,灭火器应适用于灭电气起火,不会腐蚀仪器设备(如四氯化碳灭火器)。

在使用及调试 MOS 器件时,由于 MOS 器件输入阻抗很高,容易因静电感应高电势而被击穿,因此,必须防静电。操作工作台面不宜使用良好的绝缘材料,最好使用防静电垫板,操作人员需手带静电接地环。使用或存放 MOS 器件,不能使用尼龙及化纤等材料的容器,周围空气不能太干燥,否则各种材料的绝缘电阻会很大,有利于静电的产生和积累。

### (2) 供电设备的安全

测试场所内所有的电源开关、熔丝、插头座和电源线等,不许有带电导体裸露部分,所用的电器材料的工作电压和工作电流不能超过额定值。当调试设备使用调压变压器时,注意调压器的接法。由于输入端与输出端不隔离,因此,接到电网时必须使公共端接零线,才比较安全。如果在调压器后面接一个隔离变压器,则输入线无论如何连接,均可保证安全,后面连接的电路必要时可另接地线。

### (3) 测量仪器的安全措施

测试仪器的外壳易接触的部分不应带电,非带电不可时,应加以绝缘覆盖层防护,仪器外部高出安全低电压的接线端口不应裸露,以防止使用者触摸到。仪器及附件的金属外壳都应良好接地,与机壳相通的接线柱的标志为“⊥”,不与机壳通用的公用接线柱或插孔的标志为“\*”。仪器电源线必须采用三芯的,地线必须与机壳相连,电缆长度应不短于 2m,电源插头外壳应采用橡皮或软塑料绝缘材料。

### (4) 操作人员的安全措施

在接通电源前,应检查电路及连线有无短路等情况。接通电源后,若发现冒烟、打火、异常发热等现象,应立即关掉电源,由维修人员来检查并排除故障。调试时,至少有两人在场,以防不测。操作人员不允许带电操作,若必须和带电部分接触时,应使用带有绝缘保护的工具有操作。调试时,应尽量学会单手操作,避免双手同时触及裸露导体,以防触电。在要更换元器件或改变连接线之前,应关掉电源,待滤波电容放电完毕后再进行相应的操作。

调试工作结束或离开工作场所前应将所有仪器设备关掉,并拉开电源总闸。

## 17.2.1.8 常见电子元器件检测要点

电子设备中使用着大量各种类型的电子元器件,设备发生故障大多是由于电子元器件失效或损坏引起的。因此,怎么正确检测电子元器件就显得尤其重要,这也是电子维修人员必须掌握的技能。

### 1. 电阻和电位器的检测

对于固定电阻,首先查看标志清晰,保护漆完好,无烧焦,无伤痕,无裂痕,无腐蚀,电阻体与引脚紧密接触等。对于电位器,还应检查转轴灵活,松紧适当,手感舒适。有开关的,要检查开关动作是否正常。

#### (1) 固定电阻的检测

用万用表的电阻挡对电阻进行测量,对于不同阻值的电阻要选择万用表的不同倍乘挡进行测量。对于指针式万用表,由于电阻挡的示数是非线性的,阻值越大,示数越密,所以选择合适的量程,应使表针偏转角大些,指示于  $1/3 \sim 2/3$  满量程,读数更为准确。若测得阻值超过该电阻的误差范围、阻值无限大、阻值为 0 或阻值不稳,说明该电阻器已坏。

在测量中注意拿电阻的手不要与电阻器的两个引脚相接触,这样会使手所呈现的电阻与被测

电阻并联,影响测量的准确性。另外,不能在带电情况下用万用表电阻挡检测电路中电阻器的阻值。在线检测应首先断电,再将电阻从电路中断开出来,然后进行测量。

### (2) 熔丝电阻和热敏电阻的检测

熔丝电阻一般阻值只有几欧到几十欧,若测得阻值为无限大,则已熔断。也可在线检测熔丝电阻的好坏,分别测量其两端对地电压,若一端为电源电压,一端电压为 0V,则说明熔丝电阻已熔断。

热敏电阻分正温度系数和负温度系数两种。对于正温系(PTC)热敏电阻,在常温下一般阻值不大,在测量中用烧热的电烙铁靠近电阻,这时阻值应明显增大,说明该电阻正常,若无变化说明电阻已坏,负温系热敏电阻则相反。

### (3) 可变电阻和电位器的检测

首先测量两固定端之间电阻值是否正常,若为无限大或为  $0\Omega$ ,或与标称相差较大,超过误差允许范围,都说明已损坏;电阻体阻值正常,再将万用表一只表笔接电位器滑动端,另一只表笔接电位器(可调电阻)的任一固定端,缓慢旋动轴柄,观察表针是否平稳变化,当从一端旋向另一端时,阻值从  $0\Omega$  变化到标称值(或相反),并且无跳变或抖动等现象,则说明电位器正常;若在旋转的过程中有跳变或抖动现象,说明滑动点接触不良。

### (4) 光敏电阻的检测

检测时将万用表拨到  $R \times 1k\Omega$  挡,把光敏电阻的受光面与入射光线保持垂直,于是在万用表上直接测得的电阻就是亮阻。再把光敏电阻置于完全黑暗的场所,这时万用表所测出的电阻就是暗阻。如果亮阻为几千欧至几十千欧,暗阻为几兆欧至几十兆欧,说明光敏电阻是好的。

如果要求精确测量电阻器的阻值,可通过电桥(数字式)进行测试。将电阻插入电桥元件测量端,选择合适的量程,即可从显示器上读出电阻器的阻值。例如,用电阻丝自制电阻或对固定电阻器进行处理来获得某一较为精确的电阻值时,就必须用电桥测量自制电阻的阻值。

## 2. 电容器的检查

如果没有专用检测仪器,使用万用表也能简单判断电容器的质量。

(1) 对于容量大于  $5\ 100pF$  的电容器,用万用表的欧姆挡测量电容器的两引线,应该能观察到万用表显示的阻值变化,这是电容器充电的过程。数值稳定后的阻值读数就是电容器的绝缘电阻(也称漏电阻)。假如数字式万用表显示绝缘电阻在几百千欧以下或者指针式万用表的表针停在距  $\infty$  较远的位置,表明电容器漏电严重,不能使用。

对于容量小于  $5\ 100pF$  的电容器,由于充电时间很快,充电电流很小,直接使用万用表的欧姆挡很难观察到阻值的变化。这时,可以借助一个 NPN 型三极管的放大作用进行测量。测量电路如图 17-4 所示。电容器接到 A、B 两端,由于晶体管的放大作用,就可以测量到电容器的绝缘电阻。判断方法同上所述。

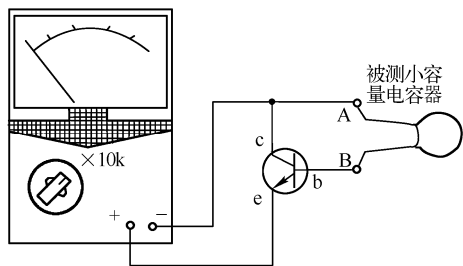


图 17-4 小容量电容器的简易测量方法

### (2) 测量电解电容器时,应该注意它的极性。

一般,电容器正极的引线长一些。测量时万用表内电源的正极与电容器的正极相接,电源负极与电容器负极相接,称为电容器的正接。电容器的正向连接比反向连接时的漏电阻大。注意:数字式万用表的红表笔内接电源正极,而指针式万用表的黑表笔内接电源正极。

当电解电容器引线的极性无法辨别时,可以根据电解电容器正向连接时绝缘电阻大,反向连

接时绝缘电阻小的特征来判别。用万用表红、黑表笔交换来测量电容器的绝缘电阻，绝缘电阻大的一次，连接表内电源正极的表笔所接的就是电容器的正极，另一极为负极。

(3) 可变电容器的漏电或碰片短路，也可用万用表的欧姆挡来检查。将万用表的两只表笔分别与可变电容器的定片和动片引出端相连，同时将电容器来回旋转几下，阻值读数应该极大且无变化。如果读数为零或某一较小的数值，说明可变电容器已发生碰片短路或漏电严重。

### 3. 激光二极管损坏判别

拆下激光二极管，测量其阻值，正常情况下反向阻值应为无穷大，正向阻值在  $20 \sim 40 \text{k}\Omega$ 。如果所测的正向阻值已超过  $50 \text{k}\Omega$ ，说明激光二极管性能已下降；如果其正向阻值已超过  $90 \text{k}\Omega$ ，说明该管已损坏，不能再使用了

### 4. 三极管的检测

#### (1) 中、小功率三极管的检测

① 测量极间电阻。将万用表置于  $R \times 100$  挡或  $R \times 1\text{k}$  挡，按照红、黑表笔的六种不同接法进行测试。其中，发射结和集电结的正向电阻值比较低，其他四种接法测得的电阻值都很高，约为几百  $\text{k}\Omega$  至无穷大。但不管是低阻还是高阻，硅材料三极管的极间电阻要比锗材料三极管的极间电阻大得多。

② 测穿透电流  $I_{\text{CEO}}$ 。通过用万用表电阻挡直接测量三极管 e-c 极之间的电阻方法，可间接估计  $I_{\text{CEO}}$  的大小，具体方法如下：万用表电阻挡的量程一般选用  $R \times 100$  挡或  $R \times 1\text{k}$  挡，对于 PNP 型管，黑表笔接 e 极，红表笔接 c 极；对于 NPN 型三极管，黑表笔接 c 极，红表笔接 e 极。要求测得的电阻越大越好。e-c 间的阻值越大，说明管子的  $I_{\text{CEO}}$  越小；反之，所测阻值越小，说明被测管的  $I_{\text{CEO}}$  越大。一般来说，中、小功率硅管和锗材料低频管，其阻值应分别在几百千欧、几十千欧及十几千欧以上；如果阻值很小或测试时万用表指针来回晃动，则表明  $I_{\text{CEO}}$  很大，管子的性能不稳定。

③ 三极管电极的判别。对于一只型号标示不清或无标志的三极管，要想分辨出它们的三个电极，也可用万用表测试。先将万用表量程开关拨在  $R \times 100$  或  $R \times 1\text{k}$  电阻挡上。红表笔任意接触三极管的一个电极，黑表笔依次接触另外两个电极，分别测量它们之间的电阻值，若测出均为几百欧低电阻时，则红表笔接触的电极为基础极 b，此管为 PNP 型管；若测出均为几十千欧至上百千欧的高电阻时，则红表笔接触的电极也为基础极 b，此管为 NPN 型管。

在判别出管型和基础极 b 的基础上，利用三极管正向电流放大系数比反向电流放大系数大的原理确定集电极。任意假定一个电极为基础极 c，另一个电极为基础极 e，将万用表量程开关拨在  $R \times 1\text{k}$  电阻挡上，对于 PNP 型管，令红表笔接 c 极，黑表笔接 e 极，再用手同时捏一下管子的 b、c 极，但不能使 b、c 两极直接相碰，测出某一阻值。然后两表笔对调进行第二次测量，将两次测的电阻相比较，对于 PNP 型管，阻值小的一次，红表笔所接的电极为基础极 c；对于 NPN 型管阻值小的一次，黑表笔所接的电极为基础极 c。

在实际应用中，小功率三极管多直接焊接在印制电路板上，由于元件的安装密度大，拆卸比较麻烦，所以在检测时常常通过用万用表直流电压挡，去测量被测三极管各引脚的电压值，来推断其工作是否正常，进而判断其好坏。

#### (2) 大功率晶体三极管的检测

利用万用表检测中、小功率三极管的极性、管型及性能的各种方法，对检测大功率三极管来说基本上适用。但是，由于大功率三极管的工作电流比较大，因而其 PN 结的面积也较大。PN 结较大，其反向饱和电流也必然增大。所以，若像测量中、小功率三极管极间电阻那样，使用万用

表的  $R \times 1k$  挡测量, 必然测得的电阻值很小, 好像极间短路一样, 所以通常使用  $R \times 10$  或  $R \times 1$  挡检测大功率三极管。

### (3) 达林顿管的检测

用万用表对达林顿管的检测包括识别电极、区分 PNP 和 NPN 类型、估测放大能力等内容。因为达林顿管的 E-B 极之间包含多个发射结, 所以应该使用万用表能提供较高电压的  $R \times 10k$  挡进行测量。

### 5. 判别结型场效应管的电极

将万用表置于  $R \times 1k$  挡, 用黑表笔接触假定为栅极 G 的引脚, 然后用红表笔分别接触另外两个引脚, 若阻值均比较小 ( $5 \sim 10\Omega$ ), 再将红、黑表笔交换测量一次。如阻值均为无穷大 ( $\infty$ ), 说明都是反向电阻 (PN 结反向), 属 N 沟道管, 且黑表笔接触的引脚为栅极 G, 并说明原先假定是正确的。若再次测量的阻值均很小, 说明是正向电阻, 属于 P 沟道场效应管, 黑表笔所接的也是栅极 G。若不出现上述情况, 可以调换红、黑表笔, 按上述方法进行测试, 直至判断出栅极为止。一般结型场效应管的源极与漏极在制造时是对称的, 所以, 当栅极 G 确定以后, 对于源极 S、漏极 D 不一定要判别, 因为这两个极可以互换使用。源极与漏极之间的电阻为几千欧。

### 6. 继电器的测试

(1) 测触点电阻 用万用表的电阻挡, 测量常闭触点与动点电阻, 其阻值应为 0; 而常开触点与动点的阻值就为无穷大。由此可以区别出常闭触点和常开触点。

(2) 测线圈电阻 用万用表  $R \times 10$  挡测量继电器线圈的阻值, 从而判断该线圈是否存在开路现象。

(3) 测量吸合电压和吸合电流 找来可调稳压电源和电流表, 给继电器输入一组电压, 且在供电回路中串入电流表进行监测。慢慢调高电源电压, 听到继电器吸合声时, 记下该吸合电压和吸合电流。为求准确, 可以多试几次而求平均值。

(4) 测量释放电压和释放电流 像上述那样连接测试, 当继电器发生吸合后, 再逐渐降低供电电压, 当听到继电器再次发生释放声音时, 记下此时的电压和电流, 亦可尝试多几次而取得释放电压和释放电流的平均值。一般情况下, 继电器的释放电压约在吸合电压的  $10\% \sim 50\%$ , 如果释放电压太小 (小于  $1/10$  的吸合电压), 则不能正常使用了, 这样会对电路的稳定性造成威胁, 工作不可靠。

### 7. 晶闸管的检测

(1) 晶闸管的引脚判别 先用万用表  $R \times 1k$  挡测量三脚之间的阻值, 阻值小的两引脚分别为控制极和阴极, 所剩一脚为阳极。再将万用表置于  $R \times 10k$  挡, 用手指捏住阳极和另一引脚, 且不让两脚接触, 黑表笔接阳极, 红表笔接剩下的一引脚, 如表针向右摆动, 说明红表笔所接为阴极, 不摆动则为控制极。

(2) 单向晶闸管的检测 万用表选电阻  $R \times 1$  挡, 用红、黑两表笔分别测任意两引脚间正反向电阻直至找出读数为数十欧的一对引脚, 此时黑表笔的引脚为控制极 G, 红表笔的引脚为阴极 K, 另一空脚为阳极 A。将黑表笔接已判断出的阳极 A, 红表笔仍接阴极 K。此时万用表指针应不动。用短接线瞬间短接阳极 A 和控制极 G, 此时万用表电阻挡指针应向右偏转, 阻值读数为  $10\Omega$  左右。如阳极 A 接黑表笔, 阴极 K 接红表笔时, 万用表指针发生偏转, 说明该单向可控硅已击穿损坏。

(3) 双向可控硅的检测 用万用表电阻  $R \times 1$  挡, 用红、黑两表笔分别测任意两引脚间正反向电阻, 结果其中两组读数为无穷大。若一组为数十欧时, 该组红、黑表所接的两引脚为第一阳极  $A_1$  和控制极 G, 另一空脚即为第二阳极  $A_2$ 。确定  $A_1$ 、G 极后, 再仔细测量  $A_1$ 、G 极间正、反

向电阻,读数相对较小的那次测量的黑表笔所接的引脚为第一阳极  $A_1$ ,红表笔所接引脚为控制极  $G$ 。将黑表笔接已确定的第二阳极  $A_2$ ,红表笔接第一阳极  $A_1$ ,此时万用表指针不应发生偏转,阻值为无穷大。再用短接线将  $A_2$ 、 $G$  极瞬间短接,给  $G$  极加上正向触发电压, $A_2$ 、 $A_1$  间阻值约  $10\Omega$  左右。随后断开  $A_2$ 、 $G$  间短接线,万用表读数应保持  $10\Omega$  左右。互换红、黑表笔接线,红表笔接第二阳极  $A_2$ ,黑表笔接第一阳极  $A_1$ ,同样万用表指针应不发生偏转,阻值为无穷大。用短接线将  $A_2$ 、 $G$  极间再次瞬间短接,给  $G$  极加上负的触发电压, $A_1$ 、 $A_2$  间的阻值也是  $10\Omega$  左右;随后断开  $A_2$ 、 $G$  极间短接线,万用表读数应不变,保持在  $10\Omega$  左右。符合以上规律,说明被测双向可控硅未损坏且三个引脚极性判断正确。

检测较大功率的可控硅时,需要在万用表黑笔中串接一节 1.5V 干电池,以提高触发电压。

#### 8. 测整流电桥各引脚的极性

将万用表置  $R \times 1k$  挡,黑表笔接桥堆的任意引脚,红表笔先后测其余三只引脚,如果读数均为无穷大,则黑表笔所接为桥堆的输出正极,如果读数为  $4 \sim 10k\Omega$ ,则黑表笔所接引脚为桥堆的输出负极,其余的两引脚为桥堆的交流输入端。

#### 9. 判断晶振的好坏

先用万用表 ( $R \times 10k$  挡) 测晶振两端的电阻值,若为无穷大,说明晶振无短路或漏电;再将试电笔插入市电插孔内,用手指捏住晶振的任一引脚,将另一引脚碰触试电笔顶端的金属部分,若试电笔氖泡发红,说明晶振是好的;若氖泡不亮,则说明晶振已损坏。

#### 10. 检查发光数码管的好坏

先将万用表置  $R \times 10k$  挡或  $R \times 100k$  挡,然后将红表笔与数码管(以共阴数码管为例)的“地”引出端相连,黑表笔依次接数码管其他引出端,七段均应分别发光,否则说明数码管已损坏。

#### 11. 判别红外接收头引脚

万用表置  $R \times 1k$  挡,先假设接收头的某脚为接地端,将其与黑表笔相接,用红表笔分别测量另两引脚电阻,对比两次所测阻值,电阻较小的一次其红表笔所接为+5V 电源引脚,另一阻值较大的则为信号引脚。反之,若用红表笔接已知地脚,黑表笔分别测已知电源脚及信号脚,则阻值都在  $15k\Omega$  以上,阻值小的引脚为+5V 端,阻值偏大的引脚为信号端。如果测量结果符合上述阻值则可判断该接收头完好。

#### 12. 光电耦合器的检测

万用表选用电阻  $R \times 100$  挡,不得选  $R \times 10k$  挡,以防电池电压过高击穿发光二极管。红、黑表笔接输入端,测正、反向电阻,正常时正向电阻为数十  $\Omega$ ,反向电阻几千欧至几十千欧。若正、反向电阻相近,表明发光二极管已损坏。万用表选电阻  $R \times 1$  挡,红、黑表笔接输出端,测正、反向电阻,正常时均接近于  $\infty$ ,否则受光管损坏。万用表选电阻  $R \times 10$  挡,红、黑表笔分别接输入、输出端测发光管与受光管之间的绝缘电阻(有条件应用兆欧表测其绝缘电阻,此时兆欧表输出额定电压应略低于被测光电耦合器所允许的耐压值),发光管与受光管间绝缘电阻正常应为  $\infty$ 。

#### 13. 变压器的检测

变压器的常见故障有开路和短路。开路故障大部分是因为引出端断线,用万用表的电阻挡容易检查出来。短路故障则不太容易判断,除了线圈电阻比标准阻值明显变小以外,绕组局部短路很难用万用表准确检查出来。一般,可以观察空载电流是否过大,空载温升是否超过正常温升。

### 17.2.1.9 在线检测器 (ICT) 简介

ICT 是 In-Circuit Tester 的简写,它是一种利用电脑技术,在大批量生产的电子产品生产线上,

测试电路板上元器件是否正确及其参数、电路装配是否正确的测试仪器。由于它不是模拟测试电路的功能、性能,所以也叫其为电路板的静态测试。它基本上由电脑、测试电路、测试压板及针床和显示、机械传动等部分组成。软件部分是 Windows 操作系统和 ICT 测试软件。

电脑部分就是一台普通的 PC, 用其 Windows 操作系统完成与测试软件的接口和在显示器上显示、打印、统计等功能。测试电路分为控制电路和开关电路。控制电路用来控制相应元器件的参数测试。例如, 选通电阻则测试其阻值, 选通电容则测试其容量, 选通电感则测其电感量等。开关电路用来接通需测试的相应元器件, 由继电器或 CMOS 半导体开关组成。

测试用针床用于接通 ICT 和被测电路板的一块工装板。工装板上根据电路板上的每一测试点的位置安装了一根测试针, 测试针是带弹性可伸缩的, 被测电路板压在针床上时, 测试针和针床以及连接电缆, 把电路板上每一个测试点连接到测试电路上。当压板上的塑料棒压住电路板往下压一段距离时, 针床上测试针受到压缩力而使测试点与测试电路实现良好的连接, 也就是被测元器件接入测试电路。

机械传动部分包括气动压板、行程开关等机构。ICT 是用压缩空气通过汽缸将压板下压、升起的。当压板下压到指定的位置时行程开关断开气路, 压板停止下压动作。

## 1. ICT 技术参数

### (1) 最大测试点数

表示设备最多能设多少个测试点。一般电阻、电容等元件只有两条引脚, 每个元件只用两个测试点就够了。ICT 有多个引脚, 每条引脚都需要设一个测试点。元件越多, 电路板越复杂, 需要的测试点就越多。因此, 测试仪需要足够多的测试点数。目前 ICT 的最大测试点数可达 2048 点, 已足够用了。

### (2) 可测试的元器件种类

早期的 ICT 只可以测试开、短路, 以及电阻、电容、电感、二极管等较少种类的元器件, 经不断改进, 现在 ICT 已可以测试三极管、稳压管、光耦、IC 等多种元器件。

### (3) 测试速度

测试速度, 是指测试一块电路板所用的最少时间。测试速度与电路板的复杂程度有关。

### (4) 测试范围

电阻的测试范围: 一般  $0.05\Omega \sim 40M\Omega$ 。

电容的测试范围: 一般  $1pF \sim 40000\mu F$ 。

电感的测试范围: 一般  $1\mu H \sim 40H$ 。

### (5) 测试电压、电流、频率

测试电压一般为  $0 \sim 10V$ , 测试电流一般为  $1\mu A \sim 80mA$ , 频率一般为  $1Hz \sim 100kHz$ 。

### (6) 电路板尺寸

最大的电路板尺寸一般为  $460 \times 350mm^2$ 。

## 2. 测试原理和方法

对于电阻是测试其阻值, 测试原理很简单, 就是在电阻的测试针上加一个电流, 然后测试这个电阻两端的电压, 利用欧姆定律算出该电阻的阻值。对于电容是测量其容量, 小电容的测试方法与电阻类似, 不过是用交流信号。大容量的电容用 DC 方法测试, 即用直流电压加在电容两端, 根据充电电流随时间按指数减少的规律, 在测试时加一定的延时时间就可测出其容量。电感的测试方法和电容的测试类似, 只用交流信号测试。

二极管单向导电特性的测试: 加一正向电流在二极管上, 二极管的正向压降为  $0.7V$  (硅材料

管)；加一反向电流在二极管上，二极管压降会很大。

三极管分三步测试：先测试 b-c 和 b-e 之间的正向压降，这和二极管的测试方法相同；再测试三极管的放大作用：在 b、e 极间加一基极电流，测试 c、e 极之间的电压。例如，b、e 极之间加 1mA 电流时，c、e 之间的电压由原来 2V 降到 0.5V，则三极管处于正常的放大工作状态。

跳线，是跨接印制板做连线用的，只有通断两种情况。测试其电阻阻值就可以判断好坏。测试方法和测试电阻是相同的。

一般地讲，对 IC 只测试其引脚是否会有连焊、虚焊等情况，至于 IC 内部性能如何是无法测试出来的。测试方法是：将 IC 的各引脚对电源  $V_{CC}$  引脚的正、反向电压测试一遍，再将各引脚对 IC 接地端 GND 引脚的正、反向电压测试一遍。与正常值进行比较，有不正常的可以判断该引脚连焊或虚焊。

ICT 的软件操作随生产厂家的不同而略有差异，大体上是类似的。一般来说，测试软件存于电脑主机 D 盘中。测试软件一般分为测试统计资料、开/短路测试、元件数值测试等。测试统计资料是 ICT 在测试产品中的产品质量统计表，会显示测试产品总数、不合格数、合格数、产品合格率及问题最多的几个元件等，提供给品质检测人员分析。

## 17.2.2 电子设备振动冲击试验

由于电子设备的特殊性，对于结构复杂的设备来说，要从理论上精确地描述设备内部各零部件的结构动态关系及其动力学模型，通常是不现实的。而借助于实验，或者采用实验手段与理论分析相结合的方法则是了解和掌握设备在特定环境中动态性能的主要途径。目前，许多具有专门用途的电子产品都有相应的技术标准和试验条件对产品进行规范，其目的是检验设备在特定环境中的可靠性和适应性。根据不同的使用要求，电子设备一般要经历包括温度和振动、冲击在内的十几种环境试验，而振动、冲击试验最容易引起设备在机械环境中的结构故障和失效，是验证设备可靠性的最严酷的试验之一。事实上，也只有通过环境试验，才能暴露和发现设备中的薄弱环节。

在运载工具中使用的电子设备，大多需要采用减振器来减弱机械环境的干扰和破坏。在环境试验时，减振器自然就要伴随设备经历所有的试验过程。因此，减振器的性能决定了设备在机械环境中受保护的程 度。在进行振动冲击试验时，应事先确认减振器的隔振和隔冲击性能。如果条件许可，应采用模拟设备装上减振器按规定的环 境条件进行预备性试验，以此来检查包括减振器和设备在内的振动系统的响应特性，以确认设备在试验中的结构完好性、工作状态以及减振器对设备的保护程度。

在振动试验中，共振对设备的危害是众所周知的。通常，人们总是希望采取措施来避开系统的共振。但是，在许多场合，尤其是运载工具中，干扰频率一般是在一个宽带范围内变化的。由于种种原因，使得引起设备或系统共振的频率甚至在一个较长的时间内无法避开。有的环境试验标准专门规定了对设备或系统的共振检查，并要求在确认的共振频率点进行规定时间的振动激励，以验证系统在实际工况中遭遇共振时的可靠性。在这种情况下，采用减振器对设备进行隔振时，应对减振器在共振区的响应特性有足够的了解。如果减振器不能有效地抑制共振，将给设备带来灾难性的后果。上面所提的预备性试验，也是综合了解这些因素的有效方法之一。

值得注意的是，在讨论电子设备的振动冲击隔离时，为了便于分析，通常是将设备简化为刚体。对电子设备来说，仅当实际工况中干扰频率很低时，这种理论上的简化才基本成立。由于电子设备一般都会遭遇干扰频率较宽的机械环境，此时，多数设备及其内部的某些结构和零部件已不再是刚体。由振动理论可知，减振器的作用只能减弱机械环境对设备的干扰，而干扰信号中尚有部分残余信号通过减振器的弹簧和阻尼传递到设备上，这些残余信号同样会对激发设备及其内



部某些结构产生一阶甚至数阶共振。尤其在频率不太高时,这种情况对内部结构的影响更为显著。因此,无论是否采用减振器,都应充分考虑到设备的结构及其零部件自身的抗振能力。

### 17.2.2.1 电子设备振动冲击的环境分类

振动、冲击环境试验可以分成很多种类。就电子设备来说,恶劣的机械环境通常出现在装载设备的运载工具中,例如飞机、火箭和导弹、舰船、卡车、坦克等。为了对设备在经受这些环境时的性能作出客观的评价,必须使试验时的振动冲击等机械环境具有再现性。因此,环境试验通常需要在实验室内采用试验机(台)进行。各种环境试验标准也是根据运载工具的特点对机械环境的再现性进行了详细的规范,并将环境条件大体划分为航空与航天、航海、地面车辆等若干种。这些环境条件对设备的干扰形式及干扰强度也各不相同。其中,航空环境(简称机载环境)的主要特点是振动频率范围很宽,在这种条件下,设备及其中的许多零部件已不再是刚体。与机载环境相比,航海环境(简称船载或舰载环境)的振动频率比较低。由于海上航行会遇上船体触礁和 underwater 爆炸,因此,设备往往需要经受高能冲击试验以检验它的抗冲击能力。上述两种振动激励的来源主要是运载工具的发动机,在人为控制下其振幅一般并不太大。而地面车辆(简称车载)的振动环境不仅来源于发动机,在很大程度上还取决于路面状态。用于野战条件的地面车辆以及其中的设备,其振动环境更为恶劣。航天环境所包括的火箭和导弹无论是振动还是冲击都很恶劣,所使用的电子设备的特点是体积小,与机载、舰载和车载环境的明显不同是使用周期短。

#### (1) 振动环境

目前,振动环境试验一般包括随机振动和正弦振动试验。与正弦振动试验相比,随机振动试验更接近于真实的机械环境,它能快速地反映出设备的结构及其元器件、组装件等自身各阶固有频率的振动特性和抗振能力。对于采用减振器的电子设备来说,高频分量的振动激励通常都被大幅度衰减,而频率较低的激振能量将被强调。激励和响应的这种变化关系只有在每个频率分量上有足够的能量累积时间才能充分反映出来,这是实验室的随机振动试验难以实现的条件;而正弦振动试验却可以满足这种要求,这也是用减振器进行隔振的电子设备大多采用正弦振动试验的原因之一。

此外,几乎所有电子设备都存在运输问题,运输过程的振动环境通常不同于设备在使用时的环境。有的环境试验标准规定:如果运输振动量值比因使用引起的振动量值高,则运输和使用情况的振动试验都要做;如果使用时的振动量值高于运输振动量值,应视两种环境对设备疲劳寿命的影响而定。运输试验的振动环境既可在实验室模拟,也可将设备装在运输车辆上,在室外的真实环境中行驶,称为跑车试验。有时,当设备很重或者体积较大而无适合的试验设备时,也可采用跑车试验来代替。跑车试验一般要根据环境条件的要求选择行车路面、里程和行车速度等。实际上,跑车试验综合反映了振动和冲击两种环境对设备的作用。

#### (2) 冲击环境

冲击的作用形式包括冲击、碰撞、倾跌与翻倒、跌落、重复自由跌落和弹跳,以及特定条件下进行的空投、舰船所遭遇的触礁、水下爆炸等。在环境试验中,可用试验机台模拟脉冲峰值、持续时间和脉冲波形。具有良好再现性的冲击环境主要包括多次非重复性冲击和多次重复性冲击,后者又称为碰撞试验(有些行业也称为颠振)。有的试验标准还规定了模拟水下爆炸、触礁等产生的冲击环境,用以检查设备在遭遇此类环境时的可靠性。这类试验称为强冲击试验或高能冲击试验,一般可在实验室条件下,用高能冲击试验机来模拟。

倾跌和翻倒以及自由跌落试验通常是检验中小型设备、机箱、元器件等在装配、装卸、维修过程中遇到冲击时的承受能力。

### 17.2.2.2 试验中的基本要求

在实验室条件下,为了使试验和结果具有再现性和可比性,必须对被试样品的响应特性和试验设备的激励严酷度进行监控、检测。此外,还应重视如下几个共性问题。

#### (1) 夹具安装

被试设备在试验台上的安装,夹具是必不可少的试验工具。试验中使用的夹具必须具有足够的刚度,从总体上说,夹具的刚度及其安装方式应使被试设备在试验过程中与实际工况保持一致。在试验频率范围内,当试验发生异常,试验结果的置信度下降时,应检查夹具的状态,排除影响试验的因素。

一些体积较大或者重心较高的设备一般要采用背面或侧面支撑,试验时需要保持这种支撑方式。主要用作背面或侧面支撑的夹具通常称为试验架。试验架的上部呈悬臂状,作为设备支撑基础的一部分,其自身的刚度对试验中的影响是不可忽视的。在试验频率范围内,即使是振动台仅作沿垂直方向的振动,由于设备的振动响应一般都会出现非垂直分量,并通过背部减振器的弹簧、阻尼传递到试验架,这时,如果试验架悬垂部位的刚度不足,将会激发其一阶甚至数阶谐振,从而导致试验无效。

#### (2) 试件安装位置

试件在试验设备上安装时,应尽可能使试件的重心垂线与试验工作台面的几何中心重合,这样可使试验设备保持其应有的精度。

#### (3) 试验设备的选择

选择振动台、冲击台和碰撞试验台时,它们的承载量和动载荷指标通常应大于被试设备的重量(包括试验夹具)、动载荷。在规定的环境严酷度条件下,试验设备的精度(如频率范围、波形及其容差等)应能满足试验要求。

#### (4) 测量系统

测量系统,包括传感器、前置放大器、分析记录仪等在内的测量系统应在试验前校准,使其满足试验要求。

#### (5) 控制点和测量点的选择

用于监测试验台输出的传感器,其安装位置应尽可能靠近试验台面的中心。采用多点监测时,监测点的选择原则是能综合反映试验台的动态特性。如果试验夹具被认为对试验结果有影响,而又没有措施排除时,应在夹具上最能反映这种影响的部位安装监测传感器。有的试验设备具有输出控制的功能,则监测点可用控制点代替。

被试设备的测量点应根据预期的响应选择感兴趣的部位。采用减振器的设备,如果在设备上最接近减振器的位置附加测量点,则既可了解减振器的作用,又可更详细地获得设备自身的动态性能。

### 17.2.2.3 试验程序

电子设备的环境试验通常又分为功能试验和环境条件试验。功能试验,是为了检验设备在使用状态中受环境干扰时的功能,俗称“带电”试验。试验量值是设备全功能正常工作时所预期的最大量值。环境条件试验,通常是设备不工作状态的试验,以检验设备在运输等环境中的性能。功能试验和环境条件试验在方法上没有本质区别,故统称为条件试验。试验程序一般为:

(1) 预处理 消除或部分消除前一个试验中对试件的影响。

(2) 初始检测 试验前对试件的外观、机械和电气性能所作的检查和测试。

(3) 条件试验 根据试验条件要求对试件进行振动或冲击试验。

(4) 中间检测 试验过程中对试验台(机)和试件的外观、机械和电气性能的检测。

(5) 恢复 条件试验结束后,为了消除可能出现的诸如大气气压和温度的变化、材料表面吸湿等非本次试验因素对试件的影响,应使其恢复到正常工作状态。

(6) 最后检测 条件试验之后,全面检测试件的外观、机械和电气性能,并确认本次条件试验对试件的影响程度以及试件是否满足试验要求。

### 17.2.3 电子设备电磁兼容试验

电子设备电磁兼容试验技术是在认识电磁干扰、研究电磁干扰和控制电磁干扰的过程中发展起来的。科学实践使人们认识到:要使一些电子、电气设备共存于一个有限空间,实现各自的功能,必须事先对这些设备进行某种约定,即确定电子设备电磁兼容指标和相应的检测办法。于是,人们在实践中花费大量精力研究、制定了各种电磁兼容标准;这些标准规定了电磁干扰的极限值,也规定了测量方法。

电磁兼容试验技术在不断发展。虚拟仪器技术使得测试系统引入人工智能,内装自检技术的应用则实现了被测系统的自动检测和故障诊断。展望未来,随着测试技术向多媒体化、网络化的迈进,一种新的电子设备电磁兼容试验体系会逐步建立起来。

#### 17.2.3.1 试验目的和分类

##### 1. 电磁兼容试验目的

电子设备交付使用之后,总在一定的电磁环境中工作。在电子系统或分系统内,设备之间除按预期目的进行有用信号传递、处理之外,难免会出现不希望有的干扰能量的传递。如果干扰能量足够大,加之时间和频率上的巧合,受干扰对象轻则引起性能降级,重则遭受损坏。为确保设备或系统的正常工作,必须在产品研制过程中和交付使用之前按标准、规范进行全面的电磁兼容测试。

电子设备电磁兼容测试的目的在于:

(1) 通过测试鉴别产品是否符合电磁兼容性标准或规范。

(2) 通过测试暴露产品设计及生产过程中在电磁兼容方面的薄弱环节,以便在进行后续程序之前及早采取改进措施。

##### 2. 电磁兼容试验的分类

电磁兼容测试,依产品的不同研制阶段可分为预兼容测试和标准测试两种。预兼容测试是在产品研制过程中进行的一种测试,所使用的测量仪器比较简单,如由一台频谱仪加近场探头或测量天线组成的预测试系统,目的是确定电路板、机箱、连接器等处是否有干扰产生或电磁泄漏,部件组装之后其周围是否有较大的辐射电磁场。预兼容测试也可确定干扰发射源的位置和了解易受干扰部件周围的电磁环境,以便有针对性地采取电磁兼容改进措施,选择合适的器件和方法,限制干扰源和保护敏感器件,达到互相之间的电磁兼容性。

标准测试,通常在产品的完成、定型阶段进行,按照产品对应的测量标准要求,测试产品的辐射和传导发射是否在标准规定的极限值以下,抗干扰能力是否达到标准规定的限值。此类测试考核的是产品整体的电磁兼容指标,使用标准规定的测量仪器及测量方法。因为不同的方法往往会得到不同的测量结果,使不同测量机构之间的测量数据缺乏一致性和可比性。

#### 17.2.3.2 测试的一般步骤

确定并进行一项电磁兼容试验,要遵循一套程序来实现,通常有以下几个步骤:

### 1. 制定试验大纲和测试细则

试验大纲通常由用户方制定,根据被测件的性质、用途、分类提出测试要求,确定试验的等级、测试的范围(如频段、场强等)、使用的标准,被测件的数量、工作的状态、敏感性监测的方法等,以指导试验的进行和设计,编写测试细则,也可作为存档的资料。

测试细则由测试方编写,根据被测方试验方案给出的信息及提出的测试项目,安排测试相关事宜,如测试系统的选用、测试布置、测试项目的顺序,一般从不具破坏性的传导发射和辐射发射测试开始,需要处理、刨开电源线或因施加干扰可能导致被测件出现故障以致损坏的抗扰度测试项目,通常放在最后进行。对小型测试,只测单台仪器或进行摸底测试时,可不编写书面的测试细则(比如完全按标推进行),但以上安排仍然存在。

### 2. 确定所依据的标准

一般可按产品的分类按照相应的测试标准进行电磁兼容测试,如计算机可参考 GB9254 信息技术类测量标准,洗衣机、电饭锅可采用家用电器类测试标准 GB4343—2,军用仪器设备必须按国家军标 151A/152A 进行测试。测试标准中包含两方面的信息:一是测试要求,它给出产品必须符合或满足的极限值;二是测试方法,规定了统一的测量仪器、指标和测试布置与测试步骤。

### 3. 交换试验接口信息

被测件进入实验室,仪器的布置摆放、监视设备的接入、电源的连接等,均需事先予以安排,特别是一些连接电缆的长度,如被测件与监视设备相连的电缆,必须专门考虑,要有足够的长度,做传导测试的电源线需从电缆束中分离出来等,否则无法进行正确的试验布置。

### 4. 检查测量仪器

正式测试前,应对测量系统进行连接及功能性检查,以确定测量仪器均工作正常,测试连接无误,测试不确定度在允许范围之内。此步骤可作为定期检查项目,也可根据标准要求,在每次测试之前进行。

### 5. 开始分项测试

测试允许不同被测件和不同测试项目交叉进行,如针对同一被测件,所有项目的测试进行完毕之后,再测试下一个被测件。用此方法时必须保证同一项目的测试条件不变;测试方的工作量较大,每测完一项需换一套系统,适合被测件较大、不易搬动的情况。也可按测试项目顺序,在测完所有的被测件之后,再换下一个项目。有些测试可以将几个被测件同时测量,如辐射抗扰度测试,只要被测件体积不是很大,并具备同时监测的手段即可。具体测试顺序由检测双方协商安排。

### 6. 出具测试报告

测试完成后,对记录的测试条件,被测件工作参数等数据、曲线按被测件和项目整理、分类,判别哪些通过,哪些未通过;未通过的条件、状态,传导或辐射发射测试超过极限值的频点、幅度等,分析并给出测试结果,形成测试报告。

报告中应包含以下内容:

- (1) 测试单位与送测单位名称。
- (2) 被测件名称、型号、数量、编号。
- (3) 测量时间、地点。
- (4) 测试项目、依据标准。
- (5) 测试系统、仪器、装置的名称、型号及检定证书号。
- (6) 测试连接图、测试条件。
- (7) 被测件工作状态,对所施加干扰的反应及敏感的现象。

(8) 测试频点, 所测干扰的幅-频曲线或时域波形图, 施加的场强、电压、功率值。

(9) 测试人员签字、审核、批准、盖章。

### 17.2.3.3 测试装置及其应用

在电子设备电磁兼容测试中, 为了使测量结果统一, 国际上对关键的测试仪器和装置的性能、规格都有详细规定。

#### 1. 电磁干扰测量仪

##### (1) 工作原理

电磁干扰测量仪是电子设备电磁兼容测试中最基本的测量仪器, 又称干扰场强仪或测试接收机。它实质是一台具有特殊性能的超外差接收机, 原理框图见图 17-5。除测量射频电压外, 配上适当的天线或其他传感器, 它还能测量场强、电流及功率。它的检波电路及输出指示能对脉冲无线电干扰的客观效果进行加权计量, 所以它不同于一般的选频电压表。

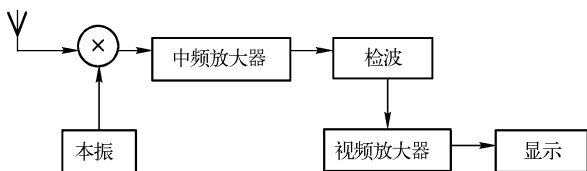


图 17-5 电磁干扰测量仪原理框图

根据 CISPR16 号出版物和《无线电干扰和抗扰度测量设备规范》的规定, 电磁干扰测量仪必备的检波方式是准峰值, 其次是平均值、峰值和均方根值检波。所以电磁干扰测量仪又称 CISPR 接收机。准峰值检波得出的测量结果恰好反映了人的听觉对脉冲干扰主观效应的加权: 重复频率高, 检波指示值也大。

根据干扰的类型, 测量时可使用带有如下检波器的测量接收机。

① 平均值检波器。它通常用于窄带干扰和窄带信号的测量, 特别适用于窄带干扰和宽带干扰的鉴别。

② 准峰值检波器。它用于宽带干扰的加权测量, 以评价听觉干扰对无线电听众的影响, 但也能用于窄带干扰的测量。

③ 峰值检波器。它用于宽带干扰和窄带干扰的测量。

频谱分析仪是最常用的电磁干扰测量仪, 采用频率扫描超外差的工作方式。混频器将天线上接收到的信号与本振产生的信号混频, 当混频的频率等于中频时, 这个信号可以通过中频放大器, 被放大后, 进行峰值检波。检波后的信号被视频放大器进行放大, 然后显示出来。由于本振电路的振荡频率随着时间变化, 因此频谱分析仪在不同的时间接收的频率是不同的。当本振振荡器的频率随着时间进行扫描时, 屏幕上就显示出了被测信号在不同频率上的幅度, 将不同频率上信号的幅度记录下来, 就得到了被测信号的频谱。根据这个频谱, 就能知道被测设备是否有超过标准规定的干扰发射, 或产生干扰的信号频率是多少。

##### (2) 频谱分析仪的使用方法

要获得正确的测量结果, 必须正确地操作频谱分析仪。现简单介绍频谱分析仪的使用方法。正确使用频谱分析仪的关键是正确设置频谱分析仪的各个参数。下面解释频谱分析仪中主要参数的意义和设置方法。

① 频率扫描范围。它规定了频谱分析仪扫描频率的上限和下限。通过调整扫描频率范围, 可以对感兴趣的频率进行细致的观察。扫描频率范围越宽, 则扫描一遍所需要时间越长, 频谱上各点的测量精度就越低, 因此, 在可能的情况下, 尽量使用较小的频率范围。在设置这个参数时,

可以通过设置扫描开始频率和终止频率来确定,例如,  $\text{start frequency}=1\text{MHz}$ ,  $\text{stop frequency}=11\text{MHz}$ 。也可以通过设置扫描中心频率和频率范围来确定,例如,  $\text{center frequency}=6\text{MHz}$ ,  $\text{span}=10\text{MHz}$ 。这两种设置的结果是一样的。

② 中频分辨带宽。它规定了频谱分析仪的中频带宽,这项指标决定了仪器的选择性和扫描时间。调整分辨带宽可以达到两个目的:一个是提高仪器的选择性,以便对频率相距很近的两个信号进行区别;另一个目的是提高仪器的灵敏度。因为任何电路都有热噪声,这些噪声会将微弱信号淹没,而使仪器无法观察微弱信号。噪声的幅度与仪器的通频带宽成正比,带宽越宽,则噪声越大。因此减小仪器的分辨带宽可以减小仪器本身的噪声,从而增强对微弱信号的检测能力。

分辨带宽一般以  $3\text{dB}$  带宽来表示。当分辨带宽变化时,屏幕上显示的信号幅度可能会发生变化。若测量信号的带宽大于通频带带宽,则当带宽增加时,由于通过中频放大器的信号总能量增加,显示幅度会有所增加。若测量信号的带宽小于通频带宽,如对于单根谱线的信号,则不管分辨带宽怎样变化,显示信号的幅度都不会发生变化。信号带宽超过中频带宽的信号称为宽带信号,信号带宽小于中频带宽的信号称为窄带信号。根据信号是宽带信号还是窄带信号能够有效地定位干扰源。

③ 扫描时间。仪器接收的信号从扫描频率范围的最低端扫描到最高端所使用的时间,叫做扫描时间。扫描时间与扫描频率范围是相匹配的。如果扫描时间过短,测量到的信号幅度比实际的信号幅度要小。

④ 视频带宽。视频带宽的作用与中频带宽相同,可以减小仪器本身的带内噪声,从而提高仪器对微弱信号的检测能力。

### (3) 用频谱分析仪分析干扰的来源

① 根据干扰信号的频率确定干扰源。在解决电磁干扰问题时,最重要的一个问题是判断干扰的来源。只有准确将干扰源定位后,才能够提出解决干扰的措施。根据信号的频率来确定干扰源是最简单的方法,因为在信号的所有特征中,频率特征是最稳定的,并且电路设计人员往往对电路中各个部位的信号频率都十分清楚。因此,只要知道了干扰信号的频率,就能够推测出干扰是哪个部位产生的。

对于电磁干扰信号,由于其幅度往往远小于正常工作信号,因此用示波器很难测量到干扰信号的频率。特别是当较小的干扰信号叠加在较大的工作信号上时,示波器无法与干扰信号同步,因此不可能得到准确的干扰信号频率。

而用频谱分析仪做这种测量是十分简单的。由于频谱分析仪的中频带宽较窄,因此能够将与干扰信号频率不同的信号滤除掉,精确地测量出干扰信号频率,从而判断出产生干扰信号的电路。

② 根据干扰信号的带宽确定干扰源。判断干扰信号的带宽也是判断干扰源的有效方法。例如,在一个宽带源的发射中可能存在一个单个高强度信号,如果能够判断这个高强度信号是窄带信号,则它不可能是从宽带发射源产生的。干扰源可能是电源中的振荡器,或工作不稳定的电路,或谐振电路。当在仪器的通频带中只有一根谱线时,就可以断定这个信号是窄带信号。

根据傅里叶变换,单根的谱线所对应的信号是周期信号。因此,当遇到单根谱线时,就要将注意力集中到电路中的周期信号电路上。

### 2. 线路阻抗稳定网络(LISN)

地面、空用、海用等电子、电气设备的供电电网制式各不相同,它们对设备电源输入端呈现的高频阻抗也不尽一致。进行传导发射电压测试时,为使测量结果反映实际使用情况并具有可比性,必须在受试设备与其电源端子之间接入统一的线路阻抗稳定网络(又称人工电源网络)。该网络既能使受试设备与电网间实现射频隔离,又能为受试设备提供稳定的高频阻抗。网络与干扰

测量仪之间的连接应保持匹配。若电网中背景干扰超过测量对电磁环境的电平要求,则可在网络之前增加电源滤波器。

### 3. 穿心电容器

在测量射频干扰电流时,为了滤除来自电网的干扰,并使受试产品产生的干扰电流就近构成回路,应在供电线路中接入穿心电容器。测试用标准穿心电容器的标称容量为  $10\mu\text{F}$ ,使用时应确保其外壳(电容器极板之一)可靠接地,并尽量减小其高频接地阻抗。

穿心电容器对电网干扰的抑制能力不如线路阻抗稳定网络能力强。

### 4. 电流探头

#### (1) 工作原理

电流探头是一种将流过导线的电流成比例地转换为电压的耦合装置,用以测量干扰电流。电流探头实质是一个带有环形磁芯的宽带变压器,其原理和结构见图 17-6。电流探头是利用变压器原理制造的能够检测导线上电流的传感器。当电流探头卡在被测导线上时,导线相当于变压器的初级,探头中的线圈相当于变压器的次级。导线上的信号电流在电流探头的线圈上感应出电流,在仪器的输入端产生电压。于是频谱分析仪的屏幕上就可以看到干扰信号的频谱。仪器上读到的电压值与导线中的电流值通过传输阻抗换算。

使用时应防止被测导线中的直流或工频电流所产生的磁场使探头磁芯饱和。为方便使用,电流探头做成钳式结构。除检测线缆的传导发射之外,电流探头还可以作为向线缆注入传导干扰的宽带耦合装置,但需加大探头内的磁芯截面。

图 17-7 给出了两个检测探头的传输阻抗曲线。这种探头的频带宽、灵敏度高,与宽带数字示波器配合,还可检测线缆中的射频传导干扰电流,包括浪涌和瞬态阻尼正弦信号。

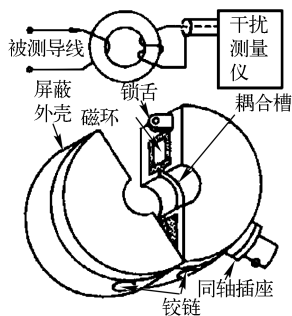


图 17-6 电流探头结构

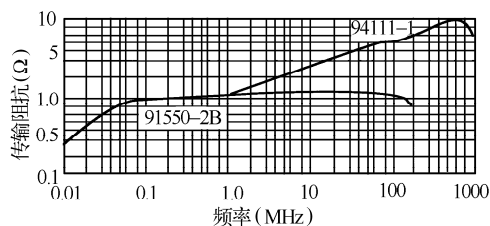


图 17-7 电流检测探头的传输阻抗特性曲线

还有一种用以测量金属结构件表面电流的探头,见图 17-8。它是上述探头的变型,工作频率范围为  $0.1\sim 100\text{MHz}$ ,借助专用的空气带状线进行标定。测量时改变探头磁路取向,可得出最大读数并判断结构件表面电流的流向。

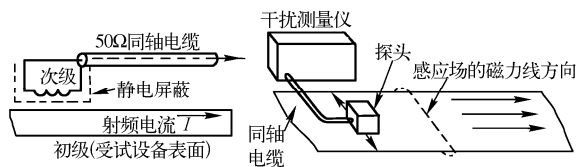


图 17-8 表面电流探头原理及应用

对于机箱的泄漏,要用近场探头进行探测。近场探头可以看成是很小的环形天线。由于它很

小,因而灵敏度很低,仅能对近场的辐射源进行探测。这样有利于对辐射源进行精确定位。由于近场探头的灵敏度较低,因而在使用时要与前置放大器配套使用。

### (2) 用电流卡钳检测共模电流

设备产生辐射的主要原因之一是电缆上有共模电流。因此,当设备或系统有超标发射时,首先应该怀疑的就是设备上外拖的各种电缆。这些电缆包括电源线电缆和设备之间的互连电缆。将电流探头卡在电缆上,这时由于探头同时卡住了信号线和回流线,因此差模电流不会感应出电压,仪器上读出的电压仅代表共模电流。

测量共模电流时,最好在屏蔽室中进行。如果不在屏蔽室中,周围环境中的电磁场会在电缆上感应出电流,造成误判断。因此,应首先将设备的电源断开,在设备没有加电的状态下测量电缆上的背景电流,并记录下来,以便与设备加电后测量的结果进行比较,排除背景的影响。

在用天线进行测量时如果将频谱分析仪的扫描频率局限在感兴趣的很小的频率范围内,则可以排除环境中的干扰。

### (3) 用近场探头检测机箱的泄漏

如果设备上外拖电缆上没有较强的共模电流,就要检查设备机箱上是否有电磁泄漏。检查机箱泄漏的工具是近场探头。将近场探头靠近机箱上的接缝和开口处,观察频谱分析仪上是否有感兴趣的信号出现。一般由于探头的灵敏度较低,即使用了放大器,很弱的信号在探头中感应的电压也很低,因此在测量时要将频谱分析仪的灵敏度调得尽量高。减小频谱分析仪的分辨带宽能够提高仪器的灵敏度,但是要注意的是,当分辨带宽很窄时,扫描时间会变得很长。为了缩短扫描时间,提高检测效率,应该使频谱分析仪的扫描频率范围尽量小。一般在用近场探头检测机箱泄漏时,都是首先用天线测出泄漏信号的精确频率,然后使仪器用尽量小的扫描频率范围覆盖住这个干扰频率。这样做的另一个好处是不会将背景干扰误判为泄漏信号。

对于机箱而言,靠近滤波器安装位置的缝隙是最容易产生电磁泄漏的。因为滤波器将信号线上的干扰信号旁路到机箱上,在机箱上形成较强的干扰电流,这些电流流过缝隙时,就会在缝隙处产生电磁泄漏。

### (4) 使用要点

当设备不能满足有关的电子设备电磁兼容标准时,就要对设备产生超标发射的原因进行调查,然后予以排除。在这个过程中,许多人经过长时间的努力,仍然没有排除故障。造成这种情况的原因是诊断工作陷入了“死循环”。这种情况可以用下面的例子说明。

假设一个系统在测试时出现了超标发射,使系统不能满足电磁兼容标准中对电磁辐射的限制。经过初步调查,原因可能有4个,它们分别是:

- ① 主机与键盘之间的互连电缆(电缆1)上的共模电流产生的辐射。
- ② 主机与打印机之间的互连电缆(电缆2)上的共模电流产生的辐射。
- ③ 主机箱面板与机箱基体之间的缝隙(开口1)产生的泄漏。
- ④ 某显示窗口(开口2)产生的泄漏。

在诊断时,首先在电缆1上套一个铁氧体磁环,以减小共模辐射,结果发现频谱仪屏幕上显示的信号并没有明显减小。试验人员认为电缆1不是一个主要的泄漏源,于是将铁氧体磁环取下,套在电缆2上,结果发现频谱仪屏幕上显示的信号还没有明显减小。结果试验人员得出结论,电缆2不是泄漏源。于是再对机箱上的泄漏进行检查。用屏蔽胶带将开口1堵上,发现频谱仪屏幕上显示的信号没有明显减小。试验人员认为开口1不是主要泄漏源,将屏蔽胶带取下,堵到开口2上。结果频谱仪上的显示信号还没有减小。试验人员一筹莫展。之所以会发生这个问题,是因



为试验人员忽视了频谱分析仪上显示的信号幅度是以 dB 为单位的。

我们看一下为什么会有这种现象。假设这 4 个泄漏源所占的成分各占 1/4，并且在每个辐射源上采取的措施能够将这个辐射源完全抑制掉。则我们采取以上 4 个措施中的一个时，频谱仪上显示信号降低的幅度  $\Delta A$  为：

$$\Delta A = 20 \lg(4/3) = 2.5 \text{ dB} \quad (17-1)$$

幅度减小这么少，显然是微不足道的。但这却已经将泄漏减少了 25%。正确的方法是：当对一个可能的泄漏源采取了抑制措施后，即使没有明显的改善，也不要将这个措施去掉，继续对可能的泄漏源采取措施。当采取到某个措施时，如果干扰幅度降低很多，并不一定说明这个泄漏源是主要的，而仅说明这个干扰源是最后一个。按照这个步骤对 4 个泄漏源逐个处理的结果如图 17-9 所示。

前面的叙述是假定对某个泄漏源采取措施后，该泄漏源被 100% 消除掉，如果这样，当最后一个泄漏源消除之后，电磁干扰的减小应为无限大。实际这是不可能的。在采取任何一个措施时，都不可能将干扰源 100% 消除。所以当最后一个泄漏源去掉后，尽管改善很大，但仍是有限值。

当设备完全符合有关的规定后，如果为了降低产品成本，减少不必要的器件，可以将采取的措施逐个去掉。首先应该考虑去掉的是成本较高器件或材料，或在正式产品上难于实现的措施。如果去掉后，产品的电磁发射并没有超标，就可以去掉这个措施。通过试验，使产品成本降到最低。

### 5. 横电磁波室 (TEM Cell)

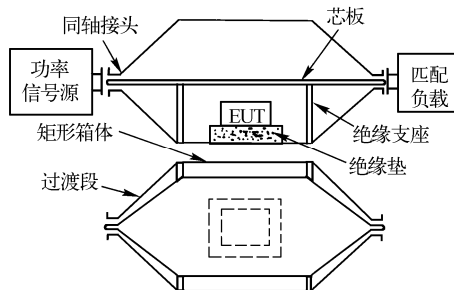


图 17-10 对称型横电磁波室结构及使用配置

有的将偏置比例做成 11:1（上大下小），并舍去两端过渡段。这种小室上半腔工作区场分布已不再是平面波，称为电磁箱 (EM Cell)。

横电磁波室的特性阻抗稍高于 50Ω。出入口关上后可确保良好的屏蔽效能。受试设备的供电系统应通过电源滤波器进入。出于受试设备信号输入或监测的需求，在侧壁安装有穿墙式同轴转接器。若在横电磁波室输出端接 50Ω 匹配负载，输入端馈入电磁能量，则在主腔体中央相应线尺寸三分之一的区域内可传输分布较均匀的横电磁波。

TEM Cell 的优点是频带宽 (0~500MHz)、激励效率高 (容易获得高场强)、无电磁泄漏、测量简便、结构简单，可以用较小的体积、较低的成本获得在开阔场地、远场条件下或无回波暗室技术所提供的试验条件。

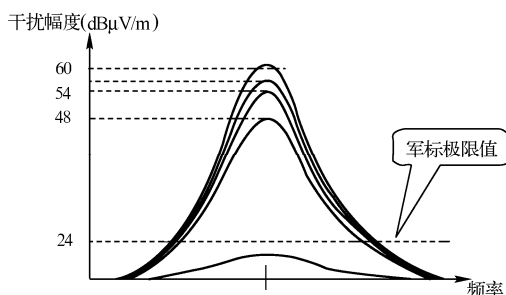


图 17-9 抑制 4 个泄漏源时干扰幅度的变化

20 世纪 70 年代初由美国 NBS 设计的横电磁波传输室 (TEM Transmission Cell, 简称 TEM Cell) 是一种由同轴线演变而来、内部能传输均匀横电磁波的矩形箱体，如图 17-10 所示。它主要由矩形外导体和平板中心导体 (或称芯板) 构成，芯板处于顶壁与底壁之间，用绝缘支架进行固定。TEM Cell 的两端通过渐变部分与精密 50Ω、N 型连接器连接。

横电磁波室，分为对称型和不对称型两类。不对称型的芯板偏向一侧，常用的上、下偏置比例为 1:3；在相同的外形尺寸条件下，室内可用的有效空间扩大。

TEM Cell 中心的场是均匀的横电磁波，而且波阻抗的数值非常接近于自由空间的波阻抗  $377\Omega$ 。这个特点有助于 TEM Cell 特性分析和测量应用：在特性分析中，TEM Cell 可以用静态电磁场的方法去分析；在测量应用中，均匀的平面波为受试设备（以下简称 EUT），提供了受照条件依据，从而便于使用统一的 EMC 标准实施测量。

TEM Cell 中心的电磁场可以加以控制，所以在电磁辐射对人体危害的研究领域中，TEM Cell 被用来做电磁辐射的生物效应试验；在对各种近场测量探头进行定标和校准时，TEM Cell 被用来提供理想的校准场源。

TEM Cell 在正常工作条件下，其内部的电场和磁场不但相互正交，而且在芯板和壁板之间的大部分空间是均匀分布的。一般而言，TEM Cell 工作频率的下限受壁板屏蔽性能的影响；而工作频率的上限（最高使用频率）则为室内的谐振和多模传输现象所限制，这两种情况都会使室内电磁场产生畸变。当 TEM Cell 的上限频率出现在芯板与上（或下）壁板构成的“波导”开始传输  $TE_{10}$  模的时候，主模的场分布会被严重扰乱。理论计算和一系列试验均表明：TEM Cell 的最高使用频率，受到其结构尺寸的制约。随着 TEM Cell 的结构尺寸加大，有效测试空间增大，容许的 EUT 尺寸也可增大，但此时的最高使用频率却下降了。一言以蔽之，TEM Cell 的最高使用频率与 EUT 的外形尺寸组成了一对矛盾。

解决上述矛盾的措施之一是将 TEM Cell 设计成非对称性结构，即将芯板的位置设计为偏置。芯板被偏置后，EUT 的容许尺寸虽然扩大了，但此时位于 TEM Cell 端部的过渡接头的设计和制造就非常困难，如外导体——喇叭板之间的偏心率很难加以修正。

解决上述矛盾的措施之二是在 TEM Cell 内部的适当位置安装吸收材料。吸收材料可以抑制高次模的产生，TEM Cell 的最高使用频率虽然被扩展了，但此时会增加主模传输的插入损耗，而且归一化后的模量随频率的变化仍有很大的不确定性。

#### 6. 吉赫兹横电磁波传输室（GTEM Cell）

1987 年由 D.Koenigstein 和 D.Hansen 两人提出的吉赫兹横电磁波传输室（Giga-Hz Transverse

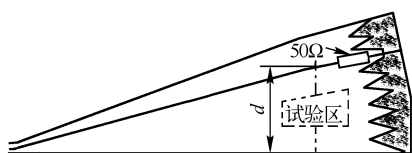


图 17-11 GTEM Cell 的结构示意简图

Electromagnetic Cell，简称 GTEM Cell）有效地解决了上述 TEM Cell 的最高使用频率与 EUT 外形尺寸之间的矛盾。它综合了 TEM Cell 和电磁屏蔽室的优点，其结构示意图如图 17-11 所示。

从图中可以看出：GTEM Cell 实质上仍然是一个双导体导波系统，它的始端是一同轴传输线，传输线的外导体逐渐演变成扩展的矩形箱体，内导体以一定角度扩

张渐变为扁平芯板。

##### （1）采用两项技术措施

与 TEM Cell 相比，GTEM Cell 主要采用了以下两项技术：

① 采用尺寸渐变的矩形棱锥体结构。这种独特结构使它可以抑制从低频到高频 TEM 行波的高次模分量，有效地抑制了 TEM Cell 在高频时产生的谐振现象。

② 采用分布式电阻面阵改善低频段的阻抗匹配。同时，采用微波吸收材料保证高频段的阻抗匹配。

##### （2）采用拼接工艺

根据 EUT 的外形尺寸需要，GTEM Cell 的结构尺寸可大可小。由于受到材料来源、加工能力、运输条件等因素的制约，故而 GTEM Cell 采用拼接工艺加工而成。从外观上看，可将其分为

两部分:

① 箱体部分: 由五块经过时效处理的 3mm 厚铝板拼接而成, 包括顶板、底板、前侧板、后侧板、后盖板; 铝板彼此间的每条接缝均用弯成一定角度的铝条覆盖。

② 过渡接头: 由前段与后段通过法兰连接而成。

为便于机械加工, GTEM Cell 内部芯板的两条侧边被取为直线; 为使激励信号的传输距离大致相等, 芯板的后边被设计成圆弧形。芯板的重量被若干玻璃钢构件从下方支撑。之所以采用玻璃钢材料, 是因为它不像尼龙那样易产生蠕变, 同时对电磁波的损耗也小。玻璃钢构件的前后间距依次变化, 这是因为相等的间距会使每个构件的反射在某些频率点上产生较大的积累而影响驻波比。玻璃钢构件同时又把 GTEM Cell 的两块侧板连接起来, 从而大大增强了 GTEM Cell 的整体结构稳定性。

GTEM Cell 的工作频频带被大大扩展, 得以从 1kHz 到 1GHz 以上。当其终端接以宽带匹配负载、始端馈入激励功率时, 传输室内就建立起均匀的球面横电磁波, 如图 17-12 所示。这种电磁波的电场和磁场强度不但有着固定的比例, 而且与馈入传输室的射频功率或端电压也有固定的关系, 因而对它很容易计算并实行控制。在 GTEM Cell 内可以进行辐射敏感度试验。而根据互易性定理, 当 GTEM Cell 内放置一发射源辐射场强时, 在传输室端口就可测出一个对应的端电压或功率, 所以, 利用 GTEM Cell 还可进行辐射发射的测量。

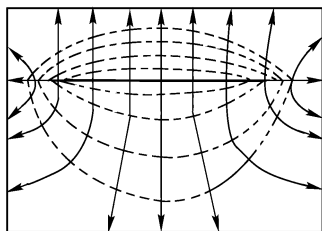


图 17-12 GTEM Cell 横截面上的场分布

### (3) GIEM Cell 的特点

归纳起来, GTEM Cell 具有以下特点:

① 与其他测试设备（如开阔场地、射频屏蔽室、电波暗室）相比, 体积较小, 因而适用于各类实验室。

② 价格较低。一般仅为电波暗室价格的 1/10、10m 开阔场地价格的 1/5。

③ 不受气候条件等自然界因素的影响。

④ 因为 GTEM Cell 安装在带有轮子的底座上, 所以移动起来很方便, 有利于灵活使用。

⑤ GTEM Cell 采用了独特的终端负载系统, 有效地抑制了高次模的产生、降低了品质因素  $Q$ , 从而提高了上限使用频率, 使之达到 1GHz 以上。

⑥ GTEM Cell 内传播的横电磁波阻抗为  $377\Omega$ , 这与自由空间远场区的电磁波特性相同, 并且 EUT “淹没”在电磁波中, 因而 GTEM Cell 较好地模拟了自由场环境; 与天线辐射照射法中 EUT 单侧受照相比, 上述自由场环境能更全面地实施考核。

⑦ GTEM Cell 的芯板较 TEM Cell 上移, 从而增大了有效测试空间, 并且在此工作区域内, 场强值的不均匀量不超过  $\pm 1\text{dB}$ ; 当然, EUT 的置入会对 GTEM Cell 内的电磁场产生一定的影响, 但因为 EUT 的电气尺寸很小, 所以这种影响对于测试结果的准确度而言无关紧要, 因此, GTEM Cell 内的均匀电磁场可用来对场强计及自制的场强探头进行标定。

⑧ GTEM Cell 中的电磁能量受外围壁板屏蔽, 不会散失, 这不但可以大大降低对信号源的功率要求, 而且与天线照射法或平行板相比, 避免了在试验现场产生电磁污染; 因此, 不但可以简化对参试设备（包括监测设备）的屏蔽防护措施, 同时还可以使参试人员免受电磁场的辐射危害。

⑨ 由于同轴线属于宽带传输线, 无色散效应, 所以在 GTEM Cell 内进行 EMC 试验时可免除常规辐射测试中需随频率变化不断更换天线的麻烦; 利用同样的测试设备, 不但可以做 FCC、VDE、MIL-STD、

GJB 和 NEMP 试验,而且还可以提高测试的速度以及数据的复现性,从而降低测试成本。

⑩ 利用不大的试验场地和少量试验设备,就能在 GTEM Cell 所覆盖的宽广频率范围内很快完成对受试设备的 EMC 试验,而且传输室自身引起的插入损耗也极小,一般不超过 1dB,这对于快速自动测试十分有利。

在 GTEM Cell 的内部,除了呈扇形展开的斧形块和芯板之外,还有一个重要组成部分,就是匹配负载。

#### (4) 碳膜无感电阻面阵

它包括两个部分,即低频段的电阻性匹配负载和高频段的微波吸收材料。

低频段的电阻性匹配负载为 0~100MHz 的行波传播提供了精确的 50Ω 匹配。考虑到功率容量、热稳定性以及对电脉冲的耐受性等因素,可以采用碳膜无感电阻串并联焊接而成的电阻面阵来作为匹配负载使用;之所以不用普通金属膜电阻,是因为那样做不能保证宽频带匹配。为减少电阻性负载与吸波材料之间的结构电容对匹配性能之影响,碳膜无感电阻面阵没有被设计成象与之相连的芯板那样宽度渐变的形状,而是被设计成前后等宽的形式。电阻面阵由并联的三块电阻板组成,这样做的目的是使电阻面阵的边缘能接近于圆弧状。由于 GTEM Cell 的输入端有时会馈入 100kV/m 的强电磁脉冲,所以一方面,为防止电阻击穿,在设计时要保证每块电阻板上串联的电阻足够多,这样在降低每只电阻功率要求的同时,也节约了制造成本;另一方面,为避免产生高压打火现象,在制作电阻板时应注意去除毛刺。

#### (5) 吸波材料及 GTEM Cell 结构

高频段的微波吸收材料被用于吸收高于 100MHz 的入射横电磁行波。吸波材料的上端呈四棱锥形状,下端为立方体形状;所有的吸波材料都被堆砌在 GTEM Cell 的后部封闭端;要求砌好后的前端面呈球面状,并且要求该球面的球心与棱锥形箱体的顶点重合;这样就使得从 GTEM Cell 输入端馈入的信号到达吸波材料各部分所经过的路程相等;换言之,吸波材料处于同一个波前面,使 GTEM Cell 能获得较好的匹配性能。吸波材料的导电性能越好,反射系数则越小;吸波材料一般由含有碳粉的泡沫塑料制成;在吸波材料中加入铁氧体成份虽可改善其低频吸收性能,但同时又会增大 GTEM Cell 终端的电抗分量。此外,当四棱锥的高度小于  $\lambda/4$  时,吸波性能会很差;而适当增加吸波材料的高度及它在 GTEM Cell 中所占的空间比则可以减少终端反射、降低驻波比。

从结构力学的角度出发,GTEM Cell 靠近终端处的侧板、顶板及后盖板均向内稍作折弯;而芯板以不破坏电磁波原有的传播特点为前提也随之在同一波阵面上稍作折弯。折弯不仅增大了各块铝板的刚性,而且使 GTEM Cell 后部的吸波材料更为方便地被砌成球面形状。

为防止在铝板拼接后的接缝处产生电磁泄漏,应在接缝处用铝制包条进行覆盖。包条应足够宽,上面的螺钉孔要设计得尽量靠近,而且螺钉孔的位置应该尽量避免横向接缝,以避免截断箱壁上的纵向表面电流;同时,接缝的重叠深度应足够大,以保证接缝板之间的面电容高频短路。

#### (6) 侧板开门

为使 EUT 能方便地进出 GTEM Cell,需在 GTEM Cell 侧板的适当位置开一门洞。这时,如何保证 GTEM Cell 的整体屏蔽性能就显得尤为重要:一方面,要使外部的干扰信号不至于扰乱内部分布均匀的电磁场;另一方面,要防止内部电磁场泄漏,以便于降低输入端信号源的功率要求。为此,可以采取以下几条措施:

① 门的设计高度不大于芯板相应位置的最小高度,以限制 GTEM Cell 侧板上纵向电流所造成的泄漏。

② 门内板与前侧板门洞具有较高的设计精度加工精度,以确保关门后镶缝平齐、门和门框

密闭、电接触良好。

③ 在门框上安装梳形弹簧片,使门的两壁得以结合紧密,从而进一步保证良好的电接触。

④ 门框上的楔形启闭锁舌由门把手通过双层门夹层内的连杆机构控制,避免了贯通式把手的天线效应所带来的电磁泄漏。

#### (7) 附属装置

除了上面介绍的之外,一个完善的 GTEM Cell 还必须具备以下的附属装置:

① 为降低发射测量中的背景噪声, GTEM Cell 应备有接地柱。

② 因为 EUT 的供电电源必须经过滤波后才能进入 GTEM Cell 内部,所以 GTEM Cell 上应配装电源滤波器。

③ 为了将 EUT 的输入、输出和检测信号引出室外而又不扰乱室内的场分布,应该选用高阻线或者光纤来进行信号传输,因此, GTEM Cell 应配装馈通式连接器和射频信号滤波器。

④ 因为 EUT 需按各种取向状态进行试验,所以在 GTEM Cell 内部必须设置非金属承载导轨及转台。导轨、转台的引入,应尽量减少对 GTEM Cell 内原有场分布的影响。

由于各自工作的需要,在外观尺寸不变的情况下,可以根据实际需要提高或降低某些技术指标,当然,这种改变是以牵动其他指标的某种变化为结果的。一个具体指标的变化要根据科学的分析方法和通过实验验证去确定。如人们常用的偏心技术,它以场均匀性的下降为代价,提高了有效测量空间的体积和单模带宽。

1993 年人们提出另一种屏蔽小室 WTEM Cell,其结构是半个 TEM Cell,这种结构在改善磁场的均匀性,降低本身的耦合与提高单模带宽方面比 TEM Cell 更容易实现。

其他类型的屏蔽小室还有很多,如无反射小室、多模腔小室等。

### 7. 试验天线

用电磁干扰测量仪、测量接收机或频谱分析仪或电磁干扰接收机测量场强时,必须借助于各种测试天线把被测场强转换成电压。电子设备电磁兼容试验频率从几十 Hz 直到几十 GHz,在这么宽的频率范围内作辐射发射试验,所用试验天线种类繁多。另外,电磁兼容测试中关心的是各种场强所造成的电磁效应,天线到受试设备的距离较近,场强值通常是视在场强,对其绝对值并不如场强计量成天线理论研究那么注重,场强的测量不确定值定在  $\pm 3\text{dB}$  之内就合乎要求。

#### (1) 试验天线的特点

① 宽带天线得到广泛的应用。电子设备电磁兼容试验频率范围宽,干扰的频率和幅度都带有随机性。为了提高测量速度,特别是进行自动测试时,必须采用宽带天线,除非只对少数已知的干扰频率点进行测量。由于大部分干扰的频率和幅度都带随机性,若采用窄带的调谐式天线,往往要先在失谐情况下找出干扰频率,然后按干扰频率调谐天线重新测量,最后才能用调谐天线的校准曲线换算出场强值。有时重新调谐测试,干扰情况却变了。宽带天线在出厂前已给出了校准曲线,使用时不必调谐,而且为自动测试提供了方便。

② 天线增益低,方向性不甚明显。在通信、雷达中使用的天线要求高增益和高定向性,而电磁兼容性试验用天线却不一定这样,一般不考虑效率,有时还有意限制其增益,展宽波束主瓣张角,以便覆盖整个试样。

③ 天线系数应尽量按现场测试条件(距离、高度和极化方式)校推。不少试验用天线都工作在近场区,测试结果对测量距离很敏感,因此试验中必须严格按试验规定进行。有些厂商给出的天线系数是按远场、无反射自由空间的条件校准的,测近场干扰时不能随便引用。其次,在近场区电场与磁场之比(波阻抗)不再是一个常数,比如电场为主的高阻场和磁场为主的低阻场。

所以,有些天线虽已给出了电场和磁场的校准系数,但只有当这些天线作远场测量时才有效。测近场干扰时,电场磁场测量结果不能再按此换算,必须分别测出电场、磁场以及它们的夹角,最后得出的是坡印亭矢量。

④ 天线的场强测量动态范围宽,应根据测量对象正确选用。电子设备电磁兼容试验的场强电平大小相差很大,对强场虽然可用衰减器扩大天线量程,但应以不损坏天线变换器或放大器为前提。反之,为提高天线测试灵敏度,特别是在 30MHz 以下,需用有源天线,不过这种天线不能用于强场测量。

⑤ 收发天线有时是不能互易的。例如,同为双锥天线,收、发用天线有区别。后者更多地考虑到敏感度测试中要辐射大功率,应尽量降低天线输入端的反射,在结构上作了改变。同样在低频场试验中,收、发环天线亦不同,使用时不能互换。

## (2) 试验常用天线

① 杆状天线。如图 17-13 所示,杆状天线是垂直放置于地面上的金属杆或棒。按有关的电子设备电磁兼容试验规范规定,测量辐射干扰时,若天线与干扰源距离不足 10m,天线总长度应为 1m,当距离大于 10m 时,天线总长度可以增加,但任何情况下都不得超过两者距离的 10%。

② 环形天线。它主要用于 30MHz 以下的磁场辐射发射和敏感度试验。尺寸较小的监测环用于接收环的标定,或在较狭小的环境中监测磁场。标准辐射环用于 25Hz~100kHz 频段磁场敏感度测试。馈电后将它在受试设备表面移动,就可找出设备最敏感的部位。

③ 对称振子天线。GB/T 6113.1 规定:被测频率等于或高于 80MHz 时,天线长度应取谐振长度;低于 80MHz 时,振子仍用 80MHz 的谐振长度。天线通过平衡/不平衡变换器与干扰测量仪连接,天线极化取向可以转动。天线中心高度应能在 1~4m 范围内调节。振子类天线的极化(包括方向性在内)鉴别能力应优于 20dB。

④ 双锥天线。国家军用标准规定采用的标准测试天线。理想无限长对顶双圆锥天线可克服普通对称振子天线频带窄的缺点,据此原理演变出双锥天线。

⑤ 对数周期天线。其外形如图 17-14 (a) 所示,类似于引向天线。但引向天线只有一对有源振子,其余是无源的反射及引向振子,工作频带窄;对数周期天线有上下两组有源振子,工作频带很宽。对数周期天线最长和最短的振子长度分别与最低和最高使用频率对应,方向图主瓣在锥底到锥顶的轴线方向。如图 17-14 (b) 所示,馈线接到对数周期天线输入同轴插座后,信号经馈管内同轴电缆先送到天线前端之后才加到上下馈电管。能量由天线前端沿馈管外表面向后部传播,在一对振子总长度  $l = \lambda / 2$  处产生谐振,相应频率分员向外辐射;余下部分继续推进,并在后续振子上依次辐射愈来愈低的频率分量,直至天线末端辐射殆尽。

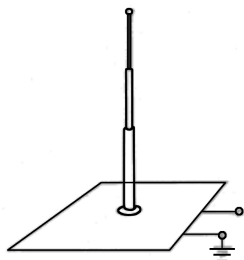


图 17-13 典型的无源杆状天线结构

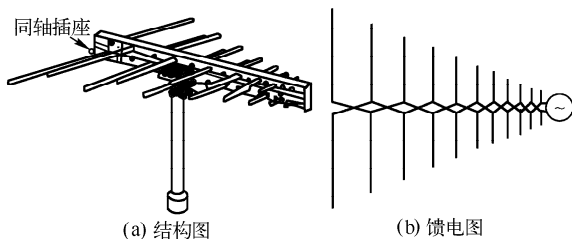


图 17-14 对数周期天线

总之,对应每一个工作频率,在对数周期天线上只有一对谐振振子及其毗邻振子有辐射能力。

谐振振子及其毗邻振子通称为激活区。

⑥ 喇叭天线。开口波导可作为最简单的微波辐射天线，由于波导内电磁波的波阻抗与空气的波阻抗不匹配，势必在波导口径面产生反射。解决这种匹配问题的有效办法是将开口波导四壁逐渐展开形成喇叭天线，如图 17-15 (a) 所示。参照喇叭天线的原理演变出了双脊喇叭天线。其特点是在喇叭上下导向板中央有金属过渡脊楞实现同轴线-波导宽带匹配；左右导向板以介质材料取代金属板，因而这类喇叭天线的工作频带很宽。图 17-15 (b) 所示双脊喇叭天线尺寸为  $16\text{cm} \times 24\text{cm} \times 28\text{cm}$ ，电压驻波比小于  $2:1$ ，频率覆盖  $1 \sim 17\text{GHz}$ ，波束张角约为  $50^\circ$ 。

⑦ 螺旋天线。它是宽带的圆极化天线，分为圆锥螺旋天线和平面螺旋天线。圆锥螺旋天线的螺旋线绕在锥体状介质上，馈线由锥底中央的同轴连接器接入后，芯线接到螺旋线始端，如图 17-16 (a) 所示。与对数周期天线相仿，当工作频率刚好与锥形螺旋中某一匝谐振时，该匝辐射能力达到最大。螺旋线上的能量在传播过程中将依次经相应的激活区向外辐射（形成端射辐射）。这种天线能与线极化天线兼容。

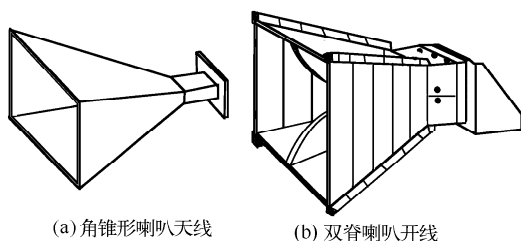


图 17-15 喇叭天线

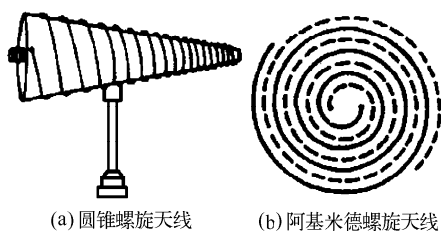


图 17-16 螺旋天线

背腔平面螺旋天线其辐射体是用印制电路工艺形成的双阿基米德螺旋线，如图 17-16 (b) 所示。改变两个螺旋线之间连接的相位关系，可构成不同的方向特性。

## 8. 专用试验室

电子设备电磁兼容测试实验室为电波半暗室和屏蔽室。前者用于辐射发射和辐射敏感度测试，后者用于传导发射和传导敏感度测试。为减少试验场地环境对 EMI 测量结果的影响，提高测量的复现性，在试验区域内应清除与辐射发射和辐射敏感度无关的物体，包括不必要的设备、电缆、桌子、椅子及储物柜等，与试验无关的人员也必须在试验室外。这样做的目的是尽量减少邻近物体对天线的加载效应，减小试验室内由于邻近物体和人员的位置变化引起的多径效应。

### (1) 屏蔽室

屏蔽室在电磁测量领域已经应用了许多年。屏蔽室能提供环境电平低而恒定的电磁环境，它为测量精度的提高，测量的可靠性和重复性的改善带来了较大的益处，被广泛用作生产、科研单位及各类试验室内仪器设备的调试场所。目前，这种屏蔽室已经向非测试的领域运用，比如在雷达站附近保护工作人员的身心健康；再比如保护计算机、医疗设备等敏感仪器。

屏蔽室在 RFI/EMI 测量中的一个主要优势是，它保证了射频与外界进出双向隔离。屏蔽室的应用也使得发射测量得以实现。而屏蔽室内的电磁残余取决于房间的衰减程度，而不是外界的发射程度。当外界环境不是非常恶劣时，一个现代化的屏蔽室可以提供足够的衰减来使外界发射的影响降至最低。

屏蔽室的尺寸没有限制，早期的军用计算机经常在巨大的屏蔽室中进行测试。洲际弹道导弹也要在非常昂贵的屏蔽室内进行测试。有的屏蔽室有几层楼高，还有一些其他的屏蔽室有飞机机库那么大。相反地，屏蔽室也可以做成便携、可移动式的。比如说建在卡车或拖车上，甚至是一个便携

式的金属网笼。两种主要的金属，钢和铜是建造屏蔽室的主要材料。钢通常用于大型屏蔽室，铜用于其他小型屏蔽室网笼。选择金属通常主要考虑重量、屏蔽效果和成本的限制。钢在 150kHz 以上与铜有相同的射频性能，但低于这个频率时，钢的导磁率使得钢有更好的电磁屏蔽效果。

无论是单层或双层结构，接下来都应考虑墙体的结构问题。用板材做成的单层墙不被广泛使用，尽管它比双层结构要便宜的多。在连接处的不同部分都由螺钉和夹子来提供有效连接。当使用螺钉时，双层墙隔离设计能够更有效。

在采用焊接方法连接时，应当考虑采用单层设计。因为如果焊接质量很高的话，电磁泄露实际上就会减小。在减少屏蔽室的空隙时，专业技术，经验是很重要的，因为有一些空隙是看不到的。用单层板材焊在金属框架上的方法，在焊接时，板材对框架有一定的压力，并且框架之间也是焊接在一起的。如果不冒着弄坏它的危险，这种焊接式屏蔽室是不能很快移动的。

目前国内生产的屏蔽室的屏蔽效能在 10kHz~10GHz 频率范围内一般能大于 100dB，屏蔽室电源线滤波器在 10kHz~1GHz 范围的插入损耗不低于 -100dB。

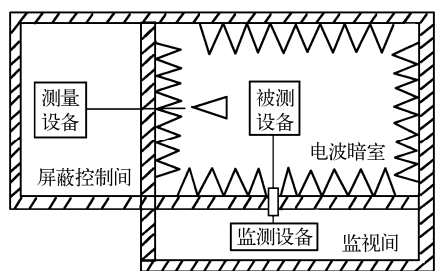


图 17-17 辐射测试的实验场地

如图 17-17 所示，将试验室分成测试间、控制间和监测间几部分。测试间只放被测设备、接收传感器及输出电缆等必要物品，测量仪器、测试人员在控制间，监测间放置被测设备的监视测量仪器，供被测方监视操作，为防止不希望的发射通过屏蔽室墙壁的转接器进入测试间，必须采取一定的措施进行隔离，如电源采用滤波器、信号通过同轴转接器或光纤馈通器

穿过屏蔽室。滤波器安装位置应远离屏蔽室出入口，更忌置于屏蔽室顶部，以免经滤波器滤除的干扰电流通过缝隙窜入屏蔽室。

通常屏蔽室设计需要提供照明、供热和空调。照明通常采用白炽式的。因为其他方式会产生离子，从而导致射频干扰。有些屏蔽室采用限制屏蔽窗区域的方法，从外部解决照明问题。屏蔽窗一般不设在屏蔽室顶上，照明系统则在屏蔽室外。当考虑供热和空调需要时，通常不需要提供附加的设施，压缩空气管可以从室外进入屏蔽室来确保合适的通风。排气设备也是必需的，排风窗可以通过蜂窝状的排风口排出废气。蜂窝状的形式不但可以提供良好的屏蔽效果，而且不影响通风质量。

屏蔽室固有的谐振现象可能使电磁场辐射试验造成高达 40dB 的误差，为此 GJB152A 《军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量》对消除屏蔽室反射规定了最低配置要求。例如，壁面所贴吸波材料在 80MHz 时回波损耗不能低于 6dB，250MHz 时大于 10dB。为减少可能影响试验结果的反射，测量时屏蔽室内应尽量少留无关器材和人员。

## (2) 电波暗室

电波暗室是至少有五个壁面装有电波吸收材料的屏蔽室，由于它基本消除了壁面反射，因而可提高测量精度，使暗室中央净区由剩余反射造成的场强测量误差不超过  $\pm 4\text{dB}$ 。由于频率愈低要求尖劈形吸收材料高度愈高，因此暗室有效空间大幅度减小。在尖劈材料底部衬以 6mm 左右的镍锌铁氧体砖，可降低尖劈材料的高度，但造价昂贵，施工困难；频率低于 30MHz 时效果欠佳。

## 9. 试验桌

有些试验按规定需要安装在模拟实际情况的试验桌上。试验桌的面积至少为  $2.25\text{m}^2$ ，短边不小于 760mm。试验桌应与屏蔽室的屏蔽壁搭接，搭接间隔不大于 1m，直流搭接电阻应小于  $2.5\text{m}\Omega$ 。在屏蔽室外测试使用的金属试验桌至少应为  $2\text{m} \times 2\text{m}$ ，且应超过测试配置边界 0.5m 以上。当采用



复合材料的试验桌时,应满足实际安装的表面电阻率要求。如果同一受试设备的不同单元正式使用时将分别安装在不同材料的装备上,测试也应采用几种相应的试验桌。

### 10. 开阔场地

开阔试验场在电子设备电磁兼容领域主要用于 30~1 000MHz 频率范围对 EUT 进行电磁辐射干扰测试,并可适用于较大型 EUT 的测试。理想的开阔试验场可作为最终判定测量结果的标准测试场地。其造价低于屏蔽暗室。开阔试验场也可用于电磁辐射敏感度(抗扰度)的测量,但不宜施加过大的场强,以免对外造成电磁环境干扰。

在计量测试领域开阔试验场占有重要地位,如天线系数的校准,国际间的比对均要求在标准开阔试验场中进行。随着广播、电视、无线通信技术的高速发展,空间电磁环境日趋复杂,这给开阔试验场的建造、选址以及使用带来了不少问题。选择远离城市的郊外地区,虽可减少和避开电磁干扰,但却给日常维护和试验以及生活管理带来诸多不便。此外,开阔试验场位于室外,自然界气候的影响也使其不能全天候工作,这也制约了开阔试验场的广泛使用。

在室外测量受试设备的电磁发射时,应在开阔、平坦的场地上进行。开阔场地应远离建筑物、电线、栅栏、树林、地下电缆和金属管道等。不同的电子设备电磁兼容标准、规范对开阔场地的尺寸要求有所差异。GB6113《电子测量仪器电磁兼容性试验规范》要求开阔场地是一个周围无反射物的椭圆形平坦场地,试验配置如图 17-18 所示。场地焦距  $F$  取决于极限值等级和测试频率。

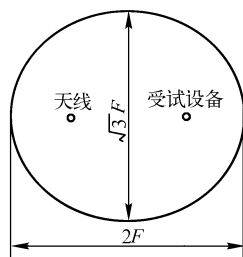


图 17-18 开阔试验场地示意

GB 9254《信息技术设备的无线电干扰极限值和测量方法》亦规定用上述椭圆形开阔场地,但焦距规定为:A级:30m;B级:10m。该标准还规定:受试设备与接收天线之间的地面上必须铺金属板作为接地平面,试验桌上孔洞及缝隙的线尺寸应远小于最小测试波长。GJB152A 统一规定测试天线到受试设备的距离为 1m,不分级别。

试验场地直接影响试验结果。无论是在屏蔽室内还是在开阔场地进行测试,都必须严格执行对试验场地的有关规定。同一受试设备在屏蔽室(或暗室)和开阔场地测试结果有冲突时,以开阔场地测试结果为准。在受试设备断电的情况下,军标规定试验场地的电磁环境电平不论是辐射还是传导至少都要比允许的极限值低 6dB;国标则为辐射:10dB;传导:20dB。

### 11. 测试装置使用要点

#### (1) 测量仪器和被测设备的隔离

对传导发射试验,任何潜在的传导路径上的串音应保证低于极限值,这是强制性的。这意味着从传感器耦合的信号应大于从任何隐蔽途径,包括从传感器到接收机的同轴电缆和接收机电源线进入接收机的干扰。在测量标准中,规定可以采取几种方法:交流分相供电、隔离变压器等。

被测设备和测量仪器由互相独立的两相交流电源分别供电,可以借助屏蔽室的电源滤波器增加被测设备和测量接收机之间的隔离,减少串音。三相交流电通常是 Y 形连接的三相四线制,第一相供照明用,第二相供测量仪器,第三相供被测设备。避免测量仪器和被测设备共用一条线路通过电源线互相干扰,影响正常测试。

另一种方法,是把测量接收机通过隔离变压器连接到交流电源上,目的是断开接收机壳体上的电源地,以避免可能的射频地电流通过地回路,对具有较高灵敏度的接收机造成影响。

#### (2) 被测设备的放置

为保证试验的重复性,对被测设备的放置方式通常有具体的规定。如 GJB152A 的辐射发射

试验中规定：试样表面离试验桌的前边缘约为 10cm，试样的电缆或导线离试验桌地平面之间最小距离是 5cm，这样做的目的是限制地电流回路的面积。如果互连导线是试样的一部分，且长度大于各个分机之间的距离，则导线必须按照一定的方式配置，蛇状敷设是不允许的。应在试样正面绕成环形，而在背面和其他面以相反的方向绕，最后在顶部盘绕，最好的方法是模拟电缆实际敷设情况。

#### 17.2.3.4 静电测量及试验

##### 1. 静电测量的目的

静电测量对于防止静电危害是十分重要的。为了解生产过程静电起电情况，判别生产过程中静电的影响程度以及检验静电防护用品、装备质量，都需要测量静电及有关参数。应当指出，有些静电的参数在理论上似乎可以计算，但由于实际条件比较复杂，单纯靠计算往往难以得到满意的结果，而必须有赖于测量。

静电检测的目的可归纳为以下几点：

- (1) 为静电防护工程的设计提供数据依据。
- (2) 在实际运行条件下，判断人体、设备、工装等有无可能成为 ESD 危害源。
- (3) 检验防静电器材的质量。
- (4) 评价防静电措施的效果。
- (5) 发生 ESD 危害后所进行的模拟测试，以查明原因、采取措施、防止类似事故的发生。

##### 2. 静电测量的特点

静电测量与一般的强电或弱电测量相比，存在着某些固有的特点。只有把握这些特点，才能选择好测试仪器、制定出合适的测试方法和测试条件，得出较准确的结果。静电测量的特点可归纳为如下几点：对测量仪表的绝缘程度要求很高，测量受各种环境条件的影响较大，测量结果的复现性较差。

##### (1) 对测量仪表的绝缘程度要求高

众所周知，静电带电往往是在诸如橡胶、塑料、化纤等高分子绝缘材料的制品上比较显著。在这些物体上电荷难于泄漏，很容易积累起来。但静电的产生是与接触——分离、摩擦或剥离等瞬间行为联系在一起的，也就是说，静电带电的“电源”不可持续地给物体提供大量的电荷；因此，在静电带电的情况下，物体的带电量和储存的能量通常是很小的。但物体的等效电容也很小，所以带电体的静电位却呈现出很高的数值，在一般工艺生产中，静电电位常见的是数百伏至数千伏；最高可达数万伏甚至数十万伏。

正因为静电带电的电量很小，所以在测试过程中即使有少量电荷从带电体流入测试仪表或泄漏掉，都会造成很大的测量误差。例如，用一般的磁电式或电磁式仪表测量物体所带静电时，往往指针还来不及偏转，电荷就已通过仪表泄漏完了，这是因为一般仪表的极间绝缘太低了。所以，进行静电测量时，为保证测量过程中带电体上的很少的静电荷不致通过仪表有明显的泄漏或泄漏得很慢，就要求测量仪表的极间有很高的绝缘性。亦即，进行静电测量时必须使用具有较高输入阻抗的高压测试仪表。

必须注意，对于静电测试用仪表，不能用一般的兆欧表判断其绝缘性能，而只能用它的放电时间常数衡量，一般市用绝缘及高压绝缘均未达到静电绝缘的要求。

##### (2) 静电测量受各种环境条件的影响明显

静电测量受环境条件的影响很大，温、湿度对物体的带电现象及测量结果的影响是众所周知

的。但是,测量的环境条件并不只是温湿度。在任何情况下,待测对象都不仅仅是由试样或带电体本身所构成的孤立系统,在其周围总是存在着或多或少的其他物体;这些物体的带电状态,形状尺寸和相互配置,都会对被测量对象的静电参数产生复杂的影响。另外,在不同的测试场所和条件下,加于待测对象的外界能量,如压力、光和电磁场等,一般随着场所与条件的变化而不尽相同,从而对测量发生的作用也不相同。以下对各种环境条件的影响进行分析。

① 温、湿度的影响。一般来说,绝缘体的表面电阻随温度及湿度的上升而降低。其原因主要在于杂质离子迁移率的增加及表面吸附水的作用,这些都会加快电荷泄漏的速度。其中,湿度的影响要比温度明显得多。例如,许多高分子聚合物的表面电阻率的对数几乎随相对湿度的提高而呈直线下降的态势。鉴于此种情况,在进行静电测量时,当空气湿度变化时必然会引起有关参数发生变化。所以在测量时必须重视温湿度条件的记录或控制。由于湿度较高时材料或制品的静电现象不明显,难以正确评价其静电性能,因此在实验室条件下测量时应把空气的湿度控制在比较低的范围。

② 周围其他物体的影响。由于被测对象总是处于周围其他物体的环境之中,所以其带电状态也会受到周围物体的影响,在进行测量时必须考虑这一因素。在电子工业中,产生 ESD 危害的重要原因之一是操作者的带电。因此,需要经常对操作者的带电状况进行测试。由于操作者都是在特定的工作环境中动作的,所以其带电状况不仅与人体本身,而且与所穿工作服、鞋子、地坪及周围的工装器材相关连,它们都是构成操作者在该环境中带电的因素,操作者的带电状况就是各种因素引起带电的综合结果。

在对人体带电进行测试时,由于操作者所处的工作环境不同,亦即构成操作者带电的各种因素的组合方式不同,所以即使把人体简单地看作导体,则所测出的人体带电状况(如带电极性、电位、电量、放电能量)也都会有很大差异。在进行静电测试,特别是现场测试时,必须先了解周围环境物体的性质,充分考虑它们对待测物体带电状态的影响,并在测试结果中注明。

③ 环境力学条件的影响。进行静电测试时,众多的环境力学条件也会对待测物体的带电状况及测试结果发生影响,其中,特别是气压、摩擦速度、摩擦次数的影响是不容忽视的。

a. 气压对带电量的影响。实验表明,物体的带电量与环境的气压有一定的依存关系。在某个气压下,物体的带电量具有最小值,而当气压较之更低或者更高时,带电量增大,如图 17-19 (a) 所示。图 17-19 (b) 表示当带电物体在气压空间中发生火花放电时,放电电压与气压和放电间隙长度的乘积之间的关系。可见,放电电压也有一个最小值。显然,在进行防害测量时,为充分估价物体带电的危害程度,应通过调节实验装置的气压,避开图 17-19 (a) 中带电量的最小值;相反,在图 17-19 (b) 中则应尽量测出火花放电电压的最小值。

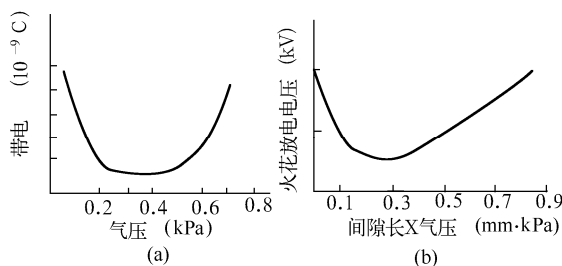


图 17-19 物体带电量与气压的关系

b. 摩擦次数的影响。按照一般的观念,似乎摩擦次数越多,物体的带电量也越大。然而,实

际情况并非如此。实验表明,在摩擦次数达到几十次时,物体的带电量即达到最大值;如继续摩擦到上千次,带电量便逐渐下降;直到约 5000 次时又稳定下来,并在以后的数千次内保持不变。

c. 接触压力的影响。摩擦时由于接触压力的增加,使得实际的接触面积增加,相应的偶电层电量也增大。在对物体的带电状态参数,如电位、电量进行实验室测试时,有两种使物体带电的方式,即摩擦带电法和电晕放电带电法,其中以前者应用最多。由于摩擦条件对物体的带电有如上述多方面的影响,所以在利用摩擦的方法使待测物体(如防静电桌垫、地垫、包装袋、周转箱、工作服)带电时,必须对摩擦速度、接触压力及摩擦材料等条件作出统一的规定,才能使试验结果较真实地反映制品的静电性能并具有可比性。例如,有些厂家对所制造的防静电塑料元件盒的性能评价是,摩擦静电压小于 100V,摩擦方法是用摩擦体在制品表面用力进行多次摩擦。显然,这种使物体带电的方法是不规范的,用力用到什么程度?多次究竟是多少次?速度是多少?这些都必须作出明确的规定。特别是摩擦次数,当次数“很多”时,所测出的电位(或电量)往往并不是最大值,而很可能是最小值,以此数值作为制品的防静电性能指标,对于实际的 ESD 防护是有害的。

### (3) 静电测量结果的复现性较差

在静电测量中常会出现这样的情况,即对同一物体的某一静电参数进行多次测量,所得各次结果会有较大差异,并且往往是各次测量间隔越长,差异越大。这就是说,测量结果的复现性差。值得注意的是,虽然在其他测量(如电参数测量)中,也都不同程度地存在复现性差的问题,但在静电测量中要突出得多。

复现性差正是由于静电测量的特点所决定的,本质上是由于静电带电现象的复杂性所决定的。举例来说,由于静电测量受诸多环境因素的影响,特别是湿度的影响大,所以当湿度变化时测量结果必然会随之改变。例如,对同一块防静电塑料板材,测量其电阻率,当相对湿度由 35% 升高到 65% 时,其数值会下降 2~3 个数量级。再如,测量同一块防静电布料的半衰期,采用摩擦带电法测出的数据要比采用电晕放电带电法测出的数据高出 3 倍。

现场测量的复现性差与生产现场的复杂环境条件有关。待测物体的带电状况是周围环境中各种因素引起带电的综合结果。在生产现场条件下,任何待测物体周围的环境,包括其他物体的相对位置、带电状态等都处于动态的变化之中;因而,待测对象的带电状况也总是处于动态的变化之中,所以不可能指望各次测量的结果都相同。从这个意义上来说,静电测量的复现性差是不可避免的。

复现性差有时也与测量方法的设计不当有关。如图 17-20 所示,橡胶带经过导辊时因接触-

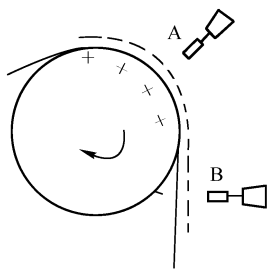


图 17-20 测量位置的选择

分离而带电。如将静电电位计的探头置于 A 处,则由于带电表面的电场大部分为金属辊所屏蔽,所以 A 处电场必小于 B 处的电场, A 处所测得的静电电位值也必然小于 B 处的电位。此时可能会作出有关橡胶带带电的错误判断。显然,正确的测量位置应选在 B 处。再如,测量工作台面、地毯等制品的表面电位时,如仍象导体那样作单点测量,其结果往往是很不可靠的。这是因为导体带电后处于静电平衡状态,表面各处电位是相等的,因此测量值与探头位置无关,只须作单点测量即可得出整个导体的带电情况。但象

塑料、橡胶、织物这样的绝缘体带电后的情况就复杂得多,一般说来各处电位值不同,其分布往往是空间的函数并与各种几何因素有关;有时各处带电的极性也会不同。因此,为了真实地反映绝缘体带电的情况必须进行多点测量。

综上所述,造成静电测量复现性不好的原因是多方面的,也是非常复杂的。从某种意义上说,复现性差是静电测量本身固有的特性,是不可能完全避免的;但可以采取尽量改善复现性,减小各

次测量的离散度,而且特别重要的是,通过这些措施提高测量结果的可比性。这些措施中最重要的就是进行静电测量时,必须统一测试仪器、测试方法及测试的环境条件,这就是静电的测试标准。

### 3. 静电电压的测量

带电体表面电压过高发生放电是造成元器件失效的主要原因之一,因此测量物体的静电电压是静电测量最常用的方法之一。接触式静电电压表也可用来测量一般直流电压和交流电压,但这种仪表不能用作监测仪表,不能分辨被测电压极性,而且只宜用来测量导体上的电压,测量误差也比较大。

非接触式仪表是利用静电感应的原理进行工作的,测量时无须同带电体接触。感应式仪表主要有振动电容式、旋转叶片式、直接感应式和集电式仪表。

振动电容式仪表由振簧式测量探头、量程变换器、交流放大器、相敏检波器、显示器和稳压电源组成。测量探头的振动电极是一个可振动的金属片。由于机械振动使振动电极与被测量带电体之间的电容发生周期性变化,在被测带电体的静电感应作用下,测量探头上就会产生一个周期性变化的电压信号。此微弱的交流信号经高输入阻抗变换器后,输入到量程转换器,再进行交流放大。仪表内设低频振荡器产生的 300Hz 交流信号分两路输出:功率较大的一路输入探头线圈,作为振动电容的驱动电源;另一路输入相敏检波器,作为相敏检波器的参考电压。相敏检波器不仅能将放大器输入的信号予以检波,还能鉴别输入信号的极性,按极性不同输出正的或负的直流电压信号,最后由显示仪表显示被测带电体的极性和电位。这种仪表具有灵敏度高、稳定性好和测量值不随时间发生衰减等特点,可用作长期监测的仪表。

集电式仪表,由探头、差分放大器和指示仪表组成。它是利用镭 226 等放射性元素发生的射线,使被测带电体周围的空气电离,电离出来的离子也可重新组合成分子。没有外电场作用时,经过一段时间后就会达到电离平衡,从而在栅极集电器周围形成一个稳定的电离区。外电场的作用造成带电物体上的电位极性的电位高低不同,使电离的气体离子就会产生定向运动,使栅极产生信号并输入到场效应管,经差分放大器放大后,由指示仪表显示出带电物体上电位的极性和数值。这种仪表的特点是测量精度比一般感应式静电电压表高。但当被电离的测量空间被空气流扰动时,电离状态会发生变化进而影响精度。

目前市场销售的静电电压测试仪种类很多,用法和性能也有所不同,作为使用者在购买和使用时应注意下列事项:

(1) 电子工业用静电电压表应当具有较高的灵敏度,可测到 100V 静电电压。

(2) 测量前,首先应检查电源电压是否符合规定标准,仪表外壳接地是否良好。有些仪表需经多次调零后,方可进行测试。

(3) 测量探头应放置在垂直于被测带电体表面某一固定的空间位置上。为避免被测带电体与探头外壳之间发生火花放电,开始测量时,探头必须先放置在较远的位置上,逐渐接近带电体,最后调整到准确测挡位置。

(4) 当带电体的被测部位是较大的平板时,其测量值是准确的。但当带电体被测表面具有一定的曲率半径时,测量值要比实际上的电位值小。

(5) 使用时,操作仪器者不能自身带电。当人体带电较高时,仪器读数会发生误差。

(6) 注意在同样测试条件下进行重复测试。

(7) 所用仪表应当具备换挡误差小、线性好、操作简单、读数方便等特点。

(8) 必须使用经过计量检验合格的仪表,否则测试结果会出现较大误差。

### 4. 电阻值的测量

(1) 固体材料体积电阻率和表面电阻率的测量方法

物体因摩擦和接触分离都可在其表面产生静电荷。对于高电阻率的物体，其上的静电荷中和或泄漏时间很长，使物体长时间带静电。低电阻率物体上电荷则很快泄漏中和，因此，电阻率是表征材料抗静电性能的重要参数。

体积电阻率的定义：在试样体积电流方向的直流电场强度与该处电流密度之比。

表面电阻率的定义：沿试样表面电流方向的直流电场强度与单位长度的表面传导电流之比。

可见，材料体积电阻率和表面电阻率二者是不相同，应分别进行测量。因为体积电阻与表面电阻是并联的（电阻率是通过电阻测量再计算出），所以测量时应尽可能排除相互之间的影响。对于固体板材、薄膜、织物及其他绝缘材料电阻率的测量，应按国家标准 GB1410—78《固体电工绝缘材料绝缘电阻、体积电阻系数和表面电阻系数试验方法》规定的同轴三电极系统来测量。

测量材料电阻率时的注意事项如下：

① 测量电压多采用直流 500V 或 100V。一般情况被测材料作为电工绝缘品使用时或者为防静电材料，测试电压为 500V。当被测材料为导静电材料时，应用 100V。对于某些材料像永久性 PVC 防静电地板，不同测试电压下，材料电阻变化较大，在测试时应予以注意。

② 每次测量前对试样进行放电，并保持试样和电极表面光滑干净，接触良好。例如，我国标准 GB1410—78 规定主电极重 0.5kg；美国 NFPA77.AST—MD257 规定电极重 5 磅，并在电极接触面附有导电橡胶使之与被测物体接触良好。

③ 测试时，测试电极直径应远大于试样厚度尺寸。

④ 多数材料的电阻率或电导率与其所处环境的温、湿度有很大关系，而且在测量前必须将材料或试样在指定时间内进行温、湿度平衡。所以测量应在温度 23℃ 左右、相对湿度 40% 左右环境中进行，测量前试样应放在相应的环境中 24h。

⑤ 当被测试样电阻率较高时，三电极系统应放入屏蔽金属箱内，对试样进行测试。考虑到试样的充电过程较长时，测量时间要适当延长数分钟。

## （2）绝缘电阻的测量

在实际检测中，对于某些高分子材料往往还要测试其绝缘电阻。绝缘材料的电阻可用比较法（伏安法）测量。在要求不高且阻值较低的场合，可以考虑用摇表测量绝缘电阻。

对于带电体与大地之间的绝缘电阻，必须在带电体一方和大地一方分别装设适当形式的测量电极。在带电体一方，如带电体是金属导体，则直接利用带电体作为测量电极。若带电体不是金属导体，则应以与之紧密接触的面积不小于 20cm<sup>2</sup> 的金属箔或导电涂料作为测量电极。在大地一方，应以接地保护电阻以下的接地体作为测量电极。测量时周围环境的相对湿度应保持在 50% 左右。

## （3）人体电阻的测量

对生产现场中作为操作者的人体静电，除经常监测其静电位外，还应对其泄漏电阻、所佩带的防静电腕带等进行检测。检测人体泄漏电阻是判断人体防静电系统是否符合防静电要求的指标之一。结合电子工业的生产实际，对人体泄漏电阻值作规定时，既要考虑到防静电要求，又要兼顾人身安全防护问题。

在检测人体电阻时无须指示出其精确数值，而只需准确可靠地指示出该电阻是否是在上述规定的范围内，即是否合格就行了。

图 17-21 是测量人体泄漏电阻的电原理图。当人站在金属板上握持金属柄时，接通开关。若人体电阻超过了 10<sup>8</sup>Ω，三极管的偏流就极小，从而集电极电流和通过继电器线圈的电流也很小，继电器不动作，红灯亮。反之，若人体电阻低于 10<sup>5</sup>Ω，晶体管偏流增大使流过继电器的电流随之增大，继电器动作，红灯灭，绿灯亮。

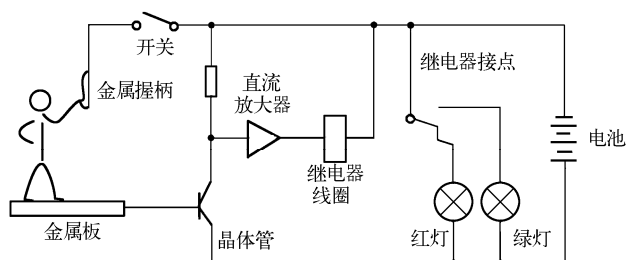


图 17-21 测量人体泄漏电阻的电原理图

#### (4) 接地电阻的测量

静电接地是防止 ESD 危害和抑制噪声电平的基本方法之一。为了防止静电积累，一般的设备、工装等，无论其是否已采取了其他防静电措施，均须可靠地接地。而测量接地电阻就是为了检查接地的可靠性。

静电接地是通过金属导线或防静电材料使带电体与大地连接，对金属导体而言，能使其与大地等电位；对静电的导体或亚导体，则提供了泄放的通道。接地电阻是指电流经接地极向大地流散时土壤所呈现的电阻，又称接地极的接地电阻，其值等于接地体的电位与通过它流入地中电流的比值。

采用接地电阻表测量接地电阻时，测量方法示意图如图 17-22 所示。其中 1 为接地电阻表。被测量的接地极 E 和电压极 P、电流极 C 埋在同一深度的一条直线上，且使 E 与 P、P 与 C 之间的距离均为 20m。将电极 E、P 和 C 分别连接到接地电阻表的测量端子 E、P 和 C 上，电压降式的接地电阻表是读取指针的指示刻度；电位差计式的接地电阻表是读取刻度盘上的刻度，以此测得接地电阻。

接地装置在运行中，因气候环境等因素的影响可能接触不良、断线及质量变坏。因此，每年应至少测量一次接地电阻，测量应在冬、春季最干燥时进行，不应在雨、雪后进行。测量时，电压极、电流极与被测接地体应当直线排列。电压极和电流极各通过一根 50cm 长的接地钢纤接地。摇动转把（120r/min），调整旋钮使指针指向零位时，示读值才为接地电阻值。

#### 5. 静电放电试验

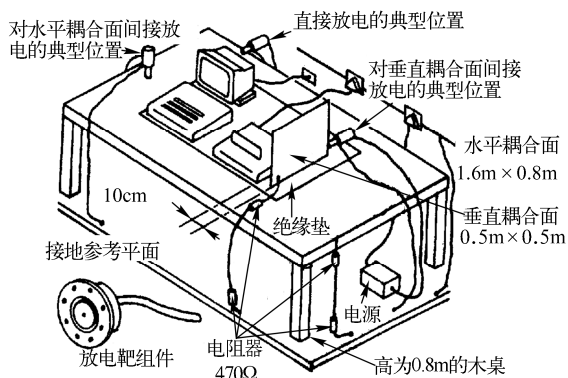
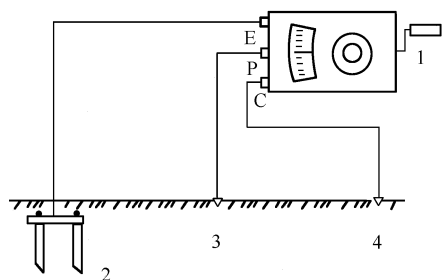


图 17-23 台式设备静电放电试验配置



1—接地电阻测试仪 2—接地体 3—电压极 4—电流极

图 17-22 接地电阻表法测量接地电阻示意图

本项试验的目的是检查信息技术设备及电子测量仪器等对静电放电的敏感度。试验设备的配置见图 17-23。高压电源及放电枪的接地线均应与参考接地平面相连接。放电枪的接地线尽可能长，放电枪到电源的连线应大于 2m，一般不超过 3m。除了模拟人体接触设备造成的直接放电之外，还要模拟设备附近的间接放电干扰，为此还配置了垂直耦合放电板和水平耦合放电板。水平板上的绝缘垫厚 0.5mm。耦合板到接地参考面之间接有高阻值泄放电阻。

静电放电试验现场的气候条件是：相对湿度 30%~60%，大气压力 86~106kPa。测试步骤如下：

(1) 将受试设备在试验桌按规定配置，接通电源，调到正常工作状态。

(2) 对受试设备上正常使用时人员可能接近的一些点和表面（例如外壳上与地隔离的一些金属零件，控制键盘及人机通信的其他开关、按键、指示器、发光二极管、插件槽口、连接器外壳等）施加直接放电；放电时放电枪应垂直于放电表面，以求改善试验结果的重复率；试验电压幅度在选定的等级限值下从最小值逐步增加，最大不得超过受试设备的规范值；在选定的放电点以最敏感的极性施加十次单次放电，每次放电间隔时间推荐以 1s 为起始值。

(3) 实际操作时可利用静电放电装置自身的硬件、软件配置事先对试验程序进行设定。

(4) 空气放电时，每次放电之后应将放电头从放电面移开，然后进行再一次放电。

(5) 间接放电时，先对水平耦合板放电，在离开受试设备每一侧 10cm 的一些点以最敏感的极性进行十次单次放电；对垂直耦合板中心至少进行十次单次放电。

故障判据通常包括：受试设备不能出现永久性的故障或指标超出技术条件之规定；数据不能丢失，储存器程序和状态不能有任何变动，接口上的各点电平也不应变化；受试设备在放电和放电衰减期间可能偏离正常工作状态，但放电衰减之后必须能立即自行恢复。

### 17.2.3.5 屏蔽测量

在许多军用、民用电子、电气设备的研制、定型和生产过程中必须做大量的电磁兼容试验，传统的开阔场地测量方法对环境的要求太高，在很大程度上限制了它们的应用。而屏蔽测量技术的根本点在于准确、灵敏，其基本特点就是被测信号与外界干扰信号之间有效隔离。最具有代表性的屏蔽测量室是微波暗室。它的基本测量方法是将测量设备和被辐射设备或器件同时置于内部，避免了外界信号对测量过程的干扰。除了用于常规的测量目的以外，它在各种电磁环境仿真技术中也得到广泛应用。然而，大型微波暗室的造价相当高，小型暗室在实际应用中又很不方便，最终导致了屏蔽小室测量技术的发展。

顾名思义，屏蔽测量小室体积小，应用灵活，价格低廉。它将被测设备置于测量装置内部，测量设备置于外部，以避免外界信号对测量信号的干扰，与微波暗室相比，测量设备本身仍处于复杂的干扰环境中，这是实际应用中应特别注意的问题，这种部分外露有可能对测量结果产生较大的影响，尤其是在被测信号相当弱的情况下。目前，受到重视的小室有 TEM Cell，GTEM Cell 和 WTEM CELL。

1987 年，CISPR16 号出版物就已推荐 TEM Cell 用于电子设备的电磁辐射敏感度（EMS）试验，GJB 152—86 在 1984 年制定时也选用 TEM Cell 作 EMS 试验设备。TEM Cell 既可用于射频连续波敏感度试验，又可用于脉冲波的敏感度试验。进行 EMS 试验时，EUT 在 TEM Cell 内所占有的空间（有效工作区）一般不得超过芯板到底板距离的三分之一以及前后壁板间距的三分之一。首先将 EUT 放置于 TEM Cell 中的适当区域，然后在 TEM Cell 的输入端馈入电磁能量并在输出端接上 50Ω 的匹配负载，则在 TEM Cell 主腔体中产生符合规定的平面电磁波；逐渐增大照射在 EUT 上的场强，直至 EUT 发生误动作或出现故障，此时的电场强度或馈入功率电平就是该电子设备的电磁敏感度值。由此可以判定电子设备抵抗外界恶劣电磁环境的能力。

#### 1. 屏蔽室屏蔽效能的测试

屏蔽室或屏蔽小室的屏蔽效能测试或性能测试是安装的最后阶段，与 MIL-STD-220 即插入损耗测试标准是一致的。主要的区别在于测试所用的设备不同。屏蔽效能测试基本上等同于电子测试设备的校准。与测试设备一样，当屏蔽小室的屏蔽效能降低时就需要对其进行校准。



当校准屏蔽小室或测定屏蔽小室的屏蔽效能时,要使用辐射测试技术。美国军方和安全部门已建立了相应的标准。这些标准描述了特定频率和测试场地条件下的测试方法、设备和测试过程。这些测试过程经过微小的调整,就能应用于任何屏蔽小室的安装,并满足用户要求。

测试屏蔽效能最经常用到的两个测试标准或测试程序是 MIL-STD-285 和 NSA-65-6。这些文件描述了对设备配置和测试场地的要求。每个程序中也规定了测试频率和衰减量。

### (1) 测试标准的描述

① MIL-STD-285。它是第一个颁布的用于测试射频屏蔽小室标准,它颁布于 1956 年 6 月,迄今为止应用最为广泛。MIL-STD-285 规定的测试程序在屏蔽室规范上经常被引用,但其频率需根据用户要求进行调整。

MIL-STD-285 标准的主要目的是为了建立一种标准或者方法,用于测量射频屏蔽室的衰减特性,这些屏蔽室用于频率范围从 100kHz 到 10GHz 的电子测试。该标准包括对测试频率、测试场地和屏蔽衰减(或者屏蔽效能)的要求。MIL-STD-285 也提供了关于测试所需设备种类的描述。

尽管 MIL-STD-285 标准覆盖了从 100kHz 到 10GHz 的频率范围,但它仅仅要求测量屏蔽室在 5 个频率点的衰减特性(参见表 17-1)。

表 17-1 MIL-STD-285 和 NSA-65-6 对衰减的要求

	MIL-STD-285	NSA-65-6
磁场	频率 150~200kHz 间 1 个频率点;要求的衰减或屏蔽效能: 70dB	1kHz 到 1MHz 间 4 个频率点: 1kHz 要求的屏蔽效能: 20dB 10kHz 要求的屏蔽效能: 56dB 100kHz 要求的屏蔽效能: 96dB 1MHz 要求的屏蔽效能: 100dB
电场	三个频率点: 200kHz、1MHz、17MHz;要求的衰减或屏蔽效能: 100dB	1kHz 到 10MHz 间 5 个频率点: 1kHz 要求的屏蔽效能: 70dB 10kHz 要求的屏蔽效能: 100dB 100kHz 要求的屏蔽效能: 100dB 1MHz 要求的屏蔽效能: 100dB 10MHz 要求的屏蔽效能: 100dB
平面波	一频率点: 400kHz;要求的衰减或屏蔽效能: 100dB	100kHz 到 10GHz 间 4 个频率点: 100MHz 要求的屏蔽效能: 100dB 400MHz 要求的屏蔽效能: 100dB 1GHz 要求的屏蔽效能: 100dB 10GHz 要求的屏蔽效能: 100dB

② NSA-65-6。它是关于评价射频屏蔽室的重要标准,发布于 1964 年 10 月。NSA-65-6 也包括屏蔽室的装配、设计目标、屏蔽室的可靠性和电子滤波器要求等规范,并附加了对屏蔽性能的规定。与 MIL-STD-285 相比,NSA-65-6 不但增加了大量被测频率点,而且明确规定了测试点的位置。NSA-65-6 同样规定至少需要在四个不同位置的移动天线来确定屏蔽室泄漏的最大信号。

### (2) 测试程序。

在进行磁场和电场屏蔽效能测试之前,需要确立参考电平和动态范围。为了确立参考电平和动态范围,发射天线(测量磁场用可调的环状天线,测量电场用可调的棒状天线)应放在屏蔽室的外面,以确保接收机或频谱分析仪的外壳没有泄漏。天线相距 24 英寸远,外加屏蔽介质约 1 英寸厚,总共相距 25 英寸。在确立参考电平和动态范围过程中天线应保持同轴。

在确定和记录参考电平之后,接收机的灵敏度或噪声基准就确定了。这可以通过把接收机天线放置在屏蔽室的内部并移去任何固定的衰减器和任何频谱仪或接收机内部的衰减器来完成。如果接收信号要求前置放大,那么在测量中要保留前置放大器。接收机灵敏度电平(以 dB 为单位)

记录在测试结果表的“接收机灵敏度”栏内。在这个测试过程中，发射机或源是关闭的。

此时，已经能确立系统或测量的动态范围。动态范围就是参考电平值和接收机灵敏度值之间的数值之差。在确立和记录参考电平、接收机灵敏度和动态范围的同时，将接收天线放在屏蔽室内事先确定的测试点处。天线与屏蔽表面（面板）之间的距离是 12 英寸，其方向与参考电平确立时保持一致。发射天线放在屏蔽室外面相同的测试点，距屏蔽表面（面板）12 英寸处并与接收天线保持同样的方向。在确立参考电平时使用的任何固定衰减器要从接收或发射线路上移出，并关上屏蔽室门。

在这个位置点的接收信号电平记录在测试结果表的“接收机电平”栏里。参考电平与接收机电平之间的数值之差就是该位置点的衰减或屏蔽效能。这个值记录在测试结果表的“衰减（屏蔽效能）”栏内。发射和接收天线放置在其他任何测试点位置，要记录接收信号电平。在所有位置点测试完成后，为了保证源的增益或接收机灵敏度不发生变化，需要建立第二参考电平。在某频率点上记录的最低值即为该频率点的衰减或屏蔽效能。

### （3）测试点位置

测试点位置包括以下一些区域：

- ① 门的边框。
- ② 波导管穿透孔。
- ③ 波导通风口（全扫描）。
- ④ 电子和通信滤波器区域（全扫描）。
- ⑤ 墙缝（缝的数量取决于屏蔽室的尺寸和在该位置点测试是否可行）。

至少要在门的六个位置点进行测试；如果屏蔽层的两个方向都可以进行测试，那么每面墙至少要测试一个缝隙。实际测试点的位置在测试时确定。

### 2. 场均匀性检测方法

在屏蔽暗室中进行电磁辐射敏感度或抗扰度测量时，发射天线在 EUT 周围产生一个规定的场强（如（1~20）V/m 或更高），以考察其是否会引起 EUT 工作性能下降或出现故障。在 EUT 周围产生的场强应充分均匀，以保证试验结果的有效性。

由于 EUT 具有一定体积，它正对发射天线的表面可能很大，因此假设在 EUT 所处位置有一个  $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$  的垂直平面，其上各点的场强具有均匀性，测试时，EUT 受照射的表面与此垂直平面重合，这样可保证照射到 EUT 表面各点的场强基本一致。

测量均匀性之前，先在选定的垂直平面内均匀分出 16 个点，然后布置测量仪器，发射天线的放置之内，电场探头距离发射天线至少 1m 以上，优先采用 3m。用电场强探头依次测量每个点的场强，在每个频率上场测出 16 个点的数值，若其中至少有 12 个点容差在 0~6dB 的范围内，则认为规定的区域内 75% 的表面场的幅值之差小于 6dB，该垂直平面上的场强符合均匀性要求，可以进行辐射抗扰度测试。

均匀性测试时，发射天线与 EUT 之间的地面上应铺设吸波材料，与实际测试状态一致，防止地面反射影响场的均匀性。此处，应采用带光纤传输的各向同性探头，不能用普通屏蔽电缆，因金属电缆会造成很大的测量误差。发射天线应选择方向图波瓣较宽的，使天线辐射场尽可能覆盖 EUT 表面，并在测试面上形成均匀的场强。

场均匀性测量是多频率（80MHz~1GHz，步长不大于 10%）、多位置（16 个点）、多极性（垂直极化、水平极化）的测量，若采用自动测量系统，则可大大节省测量时间，数据的重复性也好。自动测量软件的功能包括：控制发射信号的频率变换，探头的移动和数据采集，以及数据

处理和判别、比较。

### 17.2.3.6 传导干扰测试

传导干扰测试是测量被测设备通过电源线或信号线向外发射的干扰。因此,测试对象为设备的输入电源线、互连线及控制线等。根据干扰的性质,传导发射测量的可能是连续波干扰电压、连续波干扰电流,也可能是尖峰干扰信号。依测试频段和被测对象的不同,可采用以下几种方法测试:电流探头法、电源阻抗稳定网络法、功率吸收钳法和定向耦合器法。

#### 1. 测试布置

被测件放在离地面 80~90cm 高的实验台上,实验台面有铺金属接地板的导电平面或非导电平面,一般以被测件实际使用的环境、地点选择使用导电的或非导电的实验台,比如便携式设备可置于非导电实验台上,安装在船舱内的设备需在金属导电实验台上测试。被测电源线通过电源阻抗稳定网络接到电网上,被测件的电缆可按所依据标准的要求摆放,选择不同的长度敷设。GJB152A 要求的测试布置如图 17-24 所示。

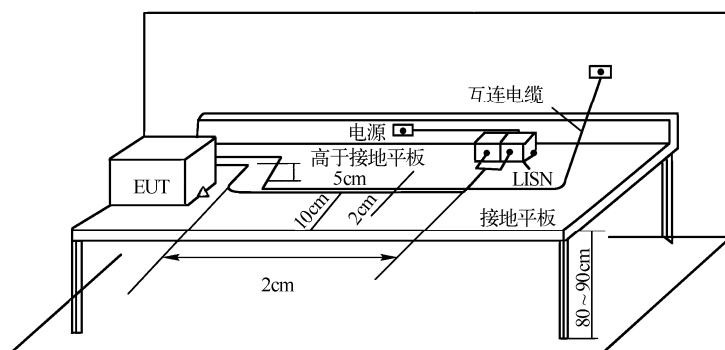


图 17-24 GJB152A 要求的电磁兼容测试 EUC 的一般布置

#### (1) 测试布置的参考

当对沿导线传播的电磁干扰按照发射限值进行符合性试验时,无论是在标准的场地(型号测试)还是在安装场地(现场测试),至少应考虑以下一些方面:

① 干扰类型。测量传导干扰有两种方法,一是测量电压,二是测量电流。两种方法都用来测量以下三种类型的传导干扰,即共模型(也称为非对称型)、差模型(也称为对称型)、不对称型。

② 测量设备。选用测量设备的类型与被测干扰特性有关。

③ 辅助设备。选用辅助设备与被测干扰类型有关,每种类型的辅助设备都会对测量的信号和线路附加射频负载。

④ 干扰源的射频负载条件。测量装置对 EUT 内的干扰源呈现出一定的射频负载阻抗。在型号测试中,这些射频负载阻抗是标准的,但在现场试验的情况下,则可能取决于安装场地的各种状况。

⑤ EUT 的试验布置。一个标准化的试验布置应当规定出参考接地、EUT 和辅助设备相对于参考地的位置、连接到参考地的方法以及 EUT 和辅助设备的相互连接方法。

如果系统不能在试验场地安装,那么可以在最终用户或制造商的安装场所进行测试。在这种情况下,系统和它的安装场所均被认为是受试系统。发射的结果是特定的,只对安装场所有效,

因为场地的特性影响着测量。然而，为了确定符合发射要求，一个给定系统的试验是在 3 个或更多个有代表性的场所完成的话，则其结果可以认为是具有类似系统的所有场地的有代表性的结果。

## (2) 影响测量条件和测量结果的因素

应在现有传导条件的情况下，用非电抗性的传感装置（高阻电压探头）测量干扰电压。那些传导条件和测量结果受到的影响有：

① 在测量中使用的现有参考地或参考体。在用户现场试验场中都不设置导电接地平面，除非其中之一或两者都是该设备的固定部分。

② 电源传导的射频特性和负载条件。

③ 周围的射频环境。

④ 传感装置的输入阻抗。

## 2. 传导干扰的测试方法

### (1) 电流探头法

测试所用传感器为电流探头，主要测量被测件沿电源线向电网发射的干扰电流，测量频率为 25Hz~10kHz，测量在屏蔽室内进行，测试示意图如图 17-25 所示。

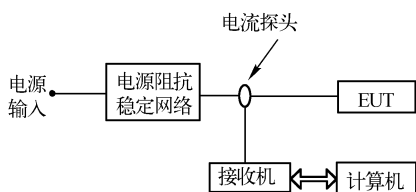


图 17-25 传导发射电流探头法测量示意图

测量时在电网和被测件之间插入一个电源阻抗稳定网络，将电网和被测件隔离，使测量到的干扰电流仅为被测件发射的，不会有来自电网的干扰混入，并且为测量提供一个稳定的阻抗，使测量的干扰电流有统一的基准，规定的统一阻抗通常为 50Ω。电流探头输出端接到测量接收机的输入端，通过电流探头转换系数将接收到的电压转换为电流，即可得到不同频率上干扰电流的幅度值。计算公式如下：

$$I=U+F \quad (17-2)$$

式中  $I$  为干扰电流 (dBA)； $U$  为端口电压 (dBV)； $F$  为电流探头转换系数 (dB/Ω)。

测量前先确定环境的影响，因为阻抗稳定网络与被测设备之间的连接电缆可能起天线的作用，从而引起虚假信号，为排除这种现象，应切断被测设备的电源，并检查环境电平是否有信号，保证环境信号小于极限值 6dB。正式测试可由自动测量系统完成参数设置、仪器控制、测量和数据处理功能，并给出测量的幅-频曲线。

### (2) 电源阻抗稳定网络法

电源阻抗稳定网络法，即利用电源阻抗稳定网络测量被测件沿电源线向电网发射的干扰电压，测量频率为 10kHz~30MHz，测量在屏蔽室内进行。电源阻抗稳定网络不仅起隔离电网和被测件的作用，使测量到的干扰电压仅为被测件发射的，不会混入来自电网的干扰，也为测量提供一个稳定的 50Ω 阻抗，使测量的干扰电压有统一的基准。

测量直接通过阻抗稳定网络上的监视测量端进行，此端口通过电容耦合的形式，将电源线上被测件产生的干扰电压引出。测量连续波干扰电压由测量接收机接收，并通过阻抗稳定网络的转换系数将接收到的电压转换为线上的实际电压，得到不同频率上干扰电压的幅度。

利用阻抗稳定网络测量连续波传导干扰需特别注意过载问题，被测件因开关或瞬时断电会引起瞬态尖峰，其幅度远远超过接收机的测量范围，很容易损坏接收设备，因此需在接收设备前端加过载保护衰减器，并且保证在被测件通电、调试好之后再接上测试设备。

测量尖峰干扰信号时,阻抗稳定网络的监视测量端接示波器。因为尖峰干扰的幅度较大,如交流 220V 电源线的开关动作产生的瞬态电压尖峰可能达到近 400V。电源线上产生的尖峰信号通常在设备和分系统中操作开关、继电器闭合瞬间出现,属于瞬态干扰,测量过程中要不断做开关动作,通过具有一定带宽的具有存储功能的示波器捕捉和测量。测试并记录一段时间内出现的尖峰干扰的最大值,将其与极限值比较,评价其是否超标。测试示意图如图 17-26 所示。

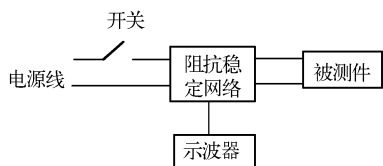


图 17-26 尖峰干扰信号测量示意图

### (3) 功率吸收钳测量干扰功率的方法

使用吸收钳来测量某些类型设备的电缆辐射干扰规律,要取决于设备的结构和尺寸。如果不带连接导线 EUT 的尺寸接近测量频率的  $1/4$  波长时,就可能产生机壳直接辐射。因此,吸收钳方法不适用于评价 EUT 的全辐射能力。一般地,这种方法对于小型 EUT 和 30~300MHz 频率范围内很适用。

如果电源线是 EUT 仅有的外部导线,其干扰能力可以认为是它向起辐射天线作用的电源线所提供的功率。该功率近似等于由 EUT 向吸收钳所提供的功率。该吸收钳环绕电源线放置并处在最大吸收功率的位置上。

设备上非电源线的外部导线也能以电源线辐射的相同方式从这样的屏蔽或非屏蔽导线向外辐射干扰。吸收钳也可用于对这些导线作诊断测试。

### (4) 定向耦合器法

测量发射机或接收机天线端子的传导发射时,采用定向耦合器法测量。通过定向耦合器将大功率发射机天线的输出接至模拟负载,通过定向耦合器的耦合端测量天线端口的传导发射。

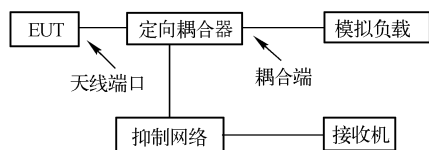


图 17-27 天线端子传导发射示意图

由于耦合出的载波功率仍很大,超出了接收机的幅度测量范围,而所测的传导发射值则远小于载波功率,因此需要将发射机的载波频率抑制掉,即在测量接收机和定向耦合器的耦合输出端之间接入抑制网络,其功能类似带阻滤波器,将载频抑制掉,测量可由自动测量系统完成,并给出测量的幅-频曲线。

测量频段为 10kHz~40GHz。测试示意图如图 17-27 所示。

#### 17.2.3.7 传导抗扰度测试

抗扰度测试是根据对 EUT 的干扰效应已经达到某一规定的水平来判断的。抗扰度测试是根据对 EUT 施加有用试验信号和无用试验信号的方法来进行的。EUT 的布置应模拟正常工作状态。随着严酷度的增加而逐渐加大无用信号,直到检测到所规定的性能下降或施加的无用信号达到了规定的抗扰度电平为止,两者取低者。

可以用直接辐射或电流、电压注入法来施加无用信号。多数情况下,为了全面评价 EUT 的抗扰度,直接辐射和电流、电压注入技术都需要采用。直接辐射试验可以用天线发射场强,由 EUT 截获场强的方法来进行。

##### 1. EUT 性能评价方法

在抗扰度测试中,如何通过各种手段对 EUT 进行性能评价呢?一般来说,可以采用客观和主观两种评价方法。客观评价方法是检测电压、电流、特定的信号和音频检波电平等,这些电信号可以采用模拟或数字记录技术进行记录。

对于那些具有图像或声音或者两者功能兼有的 EUT, 其抗扰度的主观评价方法是对具有这种图像或声音或者两者皆有的 EUT 采用监测其图像和或声音的性能降低来进行。这种方法与客观评价方法的不同之处在于不采用模拟的或数字的形式去直接记录特定的电信号或类似的信号和电平。相反, 不用可计量术语精确地表达性能降低, 而是用人的感觉术语来表达性能降低。例如, 人对烦扰效应的听觉或视觉的感受。这些无用抗扰度信号可与进行客观抗扰度评价测量时所用的无用信号相同或类似。

(1) 没有降低 设备符合设计规范。此类判别准则适用于那些敏感的保健设备和安全设备以及那些对众多消费者有影响的服务设施, 也可用于一些关键性生产过程或设备运行的抗扰度准则。

(2) 明显降低 在这种情况下, 性能已经受到了电磁干扰的影响。一些明显性能降低的例子如视频和音频电路噪声增大, 控制电路信噪比减小, 数字系统的误码率接近系统允许的最大承受能力, 或者有烦人的音频和视频干扰。这种性能降低通常用于大量生产的产品。当去除抗扰度信号后, 性能降低现象即消失。

(3) 严重降低 在这一类别, 产品不能够连续满意地工作。为了排除这种性能降低, 现场工程人员或用户服务代理人员在现场要花费相当多的时间试图找出并排除问题。这一类别的抗扰度电平应被设定在极偶然的情况下才会出现性能严重降低的水平上。此时需要操作人员介入, 如系统闭锁、复位以及存储修改, 电子产品设备才能够恢复其特定的运行状态。

(4) 失效或完全丧失工作能力 这是最严重的性能降低类别。此时, 产品完全失效并且不能重新恢复使用。最终会发生机械损坏, 不能现场修复。为了增加设备的抗扰度电平, 就急需重新设计整个设备。对用户的服务可能要不定期地暂停, 暂停时间取决于制造商生产出满意替代品的能力。

## 2. 连续波传导敏感度测试方法

传导干扰有两种来源, 一种是由空间电磁场在敏感设备的各种连接电缆上产生感应电流, 作用于设备易敏感的部分, 对设备产生影响; 另一种是由各种干扰源, 通过连接到设备上的电缆(如电源线)直接对设备产生影响。传导抗扰度测量被测件对耦合到其输入电源线、互连线及机壳上的干扰信号的承受能力, 施加的干扰信号类型主要有连续波干扰和脉冲类干扰。干扰的施加方式因测量频段和测量对象的不同而不同。

连续波传导敏感度测试方法所施加的模拟干扰信号为正弦波, 对电源线进行测试时, 50kHz 以下考核来自电源的高次谐波传导敏感度; 10kHz~400MHz 考核电缆束对电磁场感应电流的传导敏感度。干扰信号的注入分式与测量的频段及测试对象有关, 下面分别介绍。

### (1) 变压器注入法

适用于 50kHz 以下频段电源线的连续波干扰注入。测试时, 先截断靠 ETU 端的一根被测电源线, 将注入变压器的次级串入, 信号产生器接在注入变压器的初级。采用示波器直接测量干扰电压, 测试连接示意图如图 17-28 所示。

测试时按频点施加干扰电压直到标准规定的限值, 并观察被测件的工作情况。

### (2) 电流探头注入法

用于 10kHz~400MHz 频段电缆线束的连续波干扰注入。测试时, 直接将电流注入探头卡在靠 EUT 端的一束被测电缆上, 信号产生器与电流注入探头相连。因需要监测的是干扰电流, 故采用接收机或频谱仪加电流测量探头的方法进行监测。测试连接示意图如图 17-29 所示。

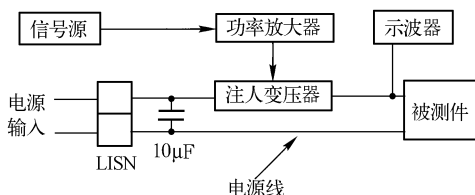


图 17-28 注入变压器法测传导敏感度示意图

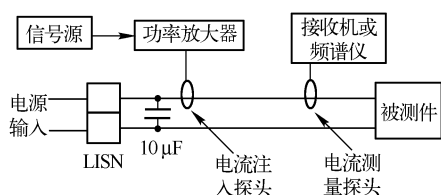


图 17-29 电流探头注入法测传导敏感度示意图

测试中，在信号产生器的每一个输出频率上分别调节输出幅度，使之达到标准规定的极限电平，保持输出不变，观察被测件是否有工作失常、性能下降或出现故障的现象。如发生敏感现象，则将信号产生器调到发生敏感的频率上，降低信号产生器输出幅度到敏感门限以下，然后再上升至门限值以上的方法来检查信号幅度的滞后，选择两者中较小的幅度作为敏感门限。

### 3. 脉冲信号的传导敏感度测试方法

施加的模拟干扰信号为各种脉冲信号，考核被测设备电源线对尖峰信号的传导敏感度或电线束对脉冲干扰产生的感应电流的传导敏感度。脉冲型干扰的注入方式有注入变压器法、并联注入法和电流探头法。

#### (1) 电源线尖峰信号传导敏感度测试方法

电源线尖峰信号传导敏感度模拟设备开关或因故障产生的电源瞬变所引起的瞬变尖峰信号，测试对象是从外部给被测件供电的不接地的交流和直流引线，特别针对采用脉冲和数字电路的设备电源线。

对使用交流供电的被测件，采用串联注入法，尖峰信号产生器接到注入变压器初级，变压器次级与被测电源线串联。测量连接图与图 17-29 相似，只要将其中的信号源、功率放大器换成尖峰信号产生器即可。而使用直流供电的设备则比较简单，尖峰信号产生器直接与被测电源线并联进行测量。

需要说明的是，为将电源线与被测件电源输入端隔离，使尖峰信号主要加在被测件上，串联注入法需在变压器靠近交流电源端串联一个  $20\mu\text{H}$  的电感；并联注入时，需在被测件直流电源端并联一个  $10\text{pF}$  的电容。

测试前，先在一个  $50\Omega$  电阻上校准输出的波形和幅度。测试中，分别改变尖峰信号产生器的输出脉冲宽度、脉冲极性、相位等参数，每种状态持续至少  $5\sim 10\text{min}$ ，观察被测件是否有工作失常、性能下降或故障。如发生敏感现象，则降低尖峰幅度到敏感门限，并确定尖峰在交流电源波形上的位置和重复频率。

#### (2) 阻尼正弦及瞬变脉冲传导敏感度测试方法

模拟干扰由阻尼正弦或瞬变脉冲产生器产生，测试对象为电源线和互连电缆束，考核被测设备电源线或电缆束对阻尼正弦或瞬变脉冲干扰的承受能力。干扰脉冲的注入方式采用电流探头法。脉冲信号通过注入探头施加到被测电缆上，由监测探头和示波器测量所加脉冲幅度的大小。调节脉冲的频率或幅度，观察被测件是否有敏感现象出现，对每一个连接器和电源线提供所确定的敏感门限值。

#### (3) 电快速瞬变脉冲群抗扰度测量方法

电快速瞬变脉冲群模拟电感性负载在断开时，由于开关触点间隙的绝缘击穿或触点弹跳等原因，在断开点产生的瞬态脉冲群。如果电感性负载多次重复开关，则脉冲群会以相应的时间间隔重复出现。这种瞬态脉冲的能量较小，一般不会引起设备的损坏，但由于其频谱分布较宽，所以

仍会对电子、电气设备的可靠工作产生影响。详细的测试方法和要求见 CB/T17626.4-1998《电磁兼容试验和测量技术电快速瞬变脉冲群抗扰度试验》。试验针对设备的供电电源端口、保护地、信号和控制端口。根据测量标准,选择试验的等级,即不同测试对象所加脉冲的幅度。

一般根据设备预期安装使用的环境条件进行选择,环境条件共分五个等级:第Ⅰ级:具有良好保护的环境;第Ⅱ级:受保护的环境;第Ⅲ级:典型的工业环境;第Ⅳ级:严酷的工业环境;第Ⅴ级:需要加以分析的特殊环境。

试验要求具备接地参考平面,其尺寸至少为  $1\text{m} \times 1\text{m}$ ,厚度不小于  $0.25\text{mm}$ ,铜板、铝板均可。电快速瞬变脉冲群产生器与参考地平面良好搭接。被测设备置于参考地平面上,落地设备与地平面之间的绝缘支座的厚度为  $0.1\text{m}$ ,台式设备放在参考地平面上方  $0.8\text{m}$  高的非金属试验台上。

电快速瞬变脉冲群通过特殊的耦合或去耦网络加到设备的电源线上,或通过专门设计制作的耦合夹具加到互连电缆线上。测试时从脉冲幅度最低的等级施加电快速瞬变脉冲群,观察被测设备的工作状态,若无影响则一直加到所选定的试验等级。

设备试验结果的判别,依据一般准则将设备性能分成四个等级:

第一级:在技术范围内性能正常,判为合格。

第二级:功能或性能暂时降低或丧失,但能自行恢复,合格与否,根据对产品的不同要求确定。

第三级:功能或性能暂时降低或丧失,但需操作者干预或系统复位,合格与否,根据对产品的不同要求确定。

第四级:因设备或软件损坏或数据丢失造成不能自行恢复的功能降低或丧失,应判为不合格。

#### (4) 浪涌抗扰度测试方法

该方法用于评估被测设备对大能量的浪涌干扰的承受能力。浪涌来自电力系统的操作瞬态、感应雷击、瞬态系统故障等在电网或通信线上产生的暂态过电压或过电流。浪涌呈脉冲状,其波前时间为数  $\mu\text{s}$ ,脉冲半峰值时间从几十  $\mu\text{s}$  至几百  $\mu\text{s}$ ,脉冲幅度可达几万 V,或一百 kA 以上,是一种能量较大的干扰。对电子仪器、设备的破坏较大。浪涌抗扰度的波形、试验等级、试验设备和试验程序在 GB/T17626.5 中有详细描述,可作为试验的依据和参考。

电压的浪涌可以通过耦合或去耦网络加到电源线和信号线上,电源线测试示意图见图 17-30。

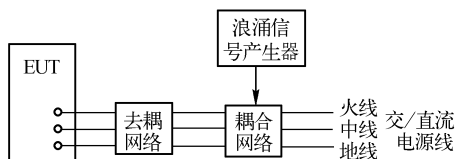


图 17-30 浪涌抗扰度测试示意图

### 17.2.3.8 辐射发射测试

辐射发射测试检测被测件通过空间传播的干扰辐射场强,标准要求在开阔场或半电波暗室中进行测试。由于符合要求的开阔场不易得到,现在大多在屏蔽暗室中测试。干扰信号通过测量天线接收,由同轴电缆传送到测量接收机测出干扰电压,再加上天线系数,即得到所测量的场强值。辐射发射分磁场辐射发射和电场辐射发射,两者测量的频段不同,所用天线也不相同。

#### 1. 测试布置

与传导测试相似,选择表面有金属接地板的或非导电的实验台,一般以被测件实际使用的环境、地点为依据,比如便携式设备可置于非导电实验台上,安装在船舱内的设备需在金属导电实验台测试。被测电源线通过电源阻抗稳定网络接到电网上,被测件的电缆可按所依据标准的要求摆放。在辐射发射测试中,电缆应与被测件并排敷设,便于天线测试接收。电场辐射发射测试布置见图 17-31。被测件放在位于转台上方的实验台上,测量天线架设在高约  $5\text{m}$  的可



升降线架上, 其升降范围为 1~4m。天线到被测件的测试距离为 3m、10m 或 30m。

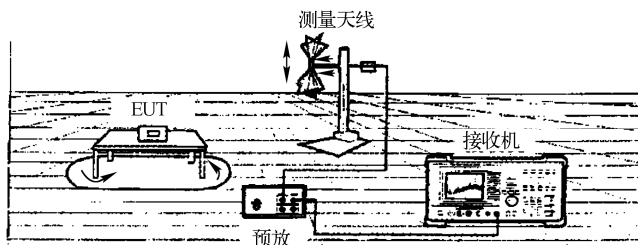


图 17-31 辐射发射测试示意图

## 2. 辐射干扰测量方法

对有些产品, 可能需要测量辐射干扰的电场分量、磁场分量或这两个分量。有些时候, 与辐射功率有关的定量测量则更为合适。通常, 要测量干扰相对于参考接地平面的水平分量和垂直分量。电场或磁场分量的测量结果一般用峰值、准峰值、平均值或有效值来表示。干扰的磁场分量通常只测到 30MHz。

在可能的情况下, 应在远场条件下进行测量。为了搜寻最大值, 可能要把地面以上的天线最小高度调低到 1m 以下, 这些高度扫描适用于水平极化和垂直极化, 只是对于垂直极化, 最小高度应调到使天线的最低点离开场地地面至少 26cm。对于磁场强度测量, 使用单环磁场天线时, 接收天线的高度可以固定在规定的标高上(从地面到环天线底部的典型值为 1m)。环天线或 EUT 应作方位旋转, 以便找到最大的被测干扰。

### (1) 磁场辐射发射测试

在磁场测量中, 当使用远天线法时, 只测量接收天线位置上场水平分量。当使用大环天线系统时, 则测量 EUT 的三个正交的磁偶极矩(注意在单天线法中, 由于反射的作用, 在天线位置场的水平分量是由 EUT 的水平和垂直偶极矩决定的)。

测量 25Hz~100kHz 频段来自被测件及其电线和电缆的磁场发射, 采用环形磁场接收天线(见图 17-32)。测量时, 将环形天线平行于被测件待测面, 或平行于电缆的轴线, 移动环天线, 记录接收机指示的最大值, 并给出所测频点和磁场强度的测量曲线。

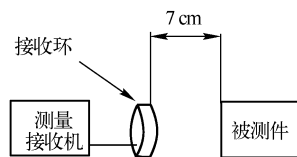


图 17-32 磁场辐射发射测量示意图

### (2) 电场辐射发射测试

① 天线测量法。电场辐射发射是测量 10kHz~17GHz 频段来自被测件及电源线和互连线的电场泄漏, 测试要求在半电波暗室中进行, 以排除外界电磁环境的影响。测试设备包括测量接收机、测量天线及阻抗稳定网络等。在整个测量频段, 需由四副天线覆盖, 不同频段需更换测量, 分别为杆天线(10kHz~30MHz)、双锥天线(30~200MHz)、双脊喇叭天线或对数周期天线(200~1 000MHz)、双脊喇叭天线(1~17GHz)。

正式测试前, 应对环境电磁场进行测量, 先切断被测件电源, 对所关心的频段进行扫描, 检查环境电平是否在极限值以下, 一般要求环境电平低于极限值 6dB, 若有超出, 则应予以记录, 以便在正式测试时剔除。

GJB152A 电场辐射发射测量要求发射天线距离被测件 1m, 发射天线中心离地面 1.2m; 其他测量标准则要求测量天线距被测件 3m、10m 或 30m 等, 测量天线在 1~4m 的范围内扫描, 被测件在转台上旋转, 以便寻找辐射的最大场强。测量时, 由测量软件选择符合测量标准要求的测量

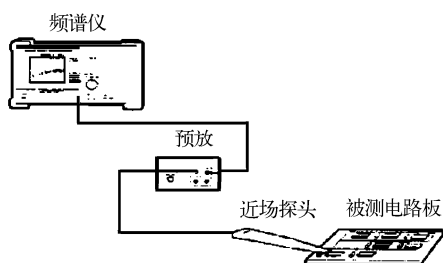


图 17-33 近场探头测试示意图

17-33。由于近场探头实际接收的效率不高，灵敏度偏低，常与前置放大器（即预放）相连，以提高接收的灵敏度。

### 17.2.3.9 辐射抗扰度测试

辐射抗扰度指标用于考核电子设备对辐射电磁场的承受能力，观其是否会出现性能降低或故障。试验对象包括电子系统、设备及其互连电缆。干扰场强分为磁场、电场和瞬变电磁场。干扰信号的类型可以是连续波、加调制的连续波及瞬变脉冲。辐射电磁场的施加方式有电波暗室中的天线辐射法、TEM 室和 GTEM 室法等。

#### (1) 用天线法进行辐射抗扰度测试的方法

在半电波暗室中进行天线法辐射抗扰度测试时，标准规定：电场发射天线距被测件 1m，磁场天线距被测件表面 5m。发射的干扰电磁场应对着被测件最敏感的部位照射，例如，有接缝的板面、电缆连接处、通风窗、显示面板等处。天线法辐射抗扰度测量示意图见图 17-34。

用于抗扰度测量的发射天线通常是宽带天线，可承受大功率。辐射场强所需的宽带功率放大器的最大输出功率由辐射的场强来确定，一般辐射 20V/m 场强。在低频段，发射天线的尺寸远小于工作波长，辐射效率很低，必须用大功率推动，才能达到要求的场强值。

测试通常由自动测试系统及测量软件来完成。通过软件可以控制和调节测量仪器，处理测试数据，如通过电场探头监测被测设备处的场强大小，并调节信号源使之达到标准要求的值等。试验在测量软件控制下，以一定的步长进行辐射场的频率扫描，由监测设备或视频监视器观测被测件在辐射电磁场中的工作情况。产品合格的一般判据可参见“电快速瞬变脉冲群试验”。

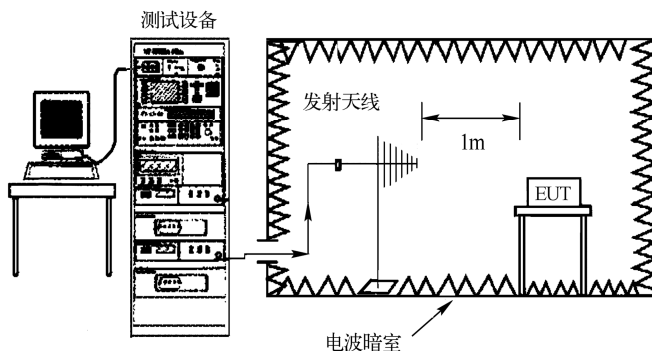


图 17-34 天线法测量电场辐射抗扰度示意图

#### (2) TEM 室和 GTEM 室辐射抗扰度测试方法

在 TEM 室内测量辐射抗扰度，如图 17-35 所示。

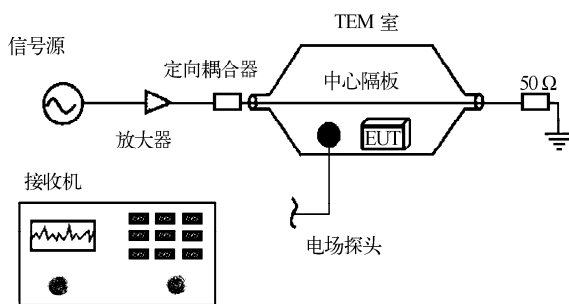


图 17-35 TEM 室测量辐射抗扰度

GTEM 室测试示意图如图 17-36 所示。

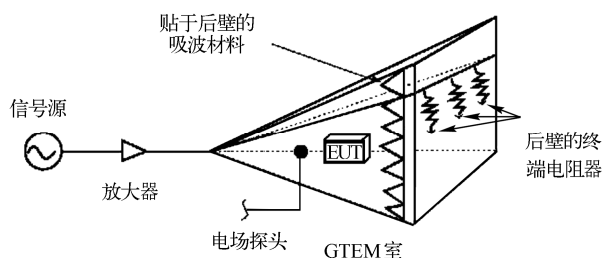


图 17-36 GTEM 室测量辐射抗扰度

在 TEM 室和 GTEM 室内进行辐射敏感度测试，同样可采用自动测试系统及测量软件完成。通过电场探头监测被测件处的场强，或由计算公式得到的输入功率值。测量软件控制信号源以一定的步长进行辐射场的频率扫描，由监测设备或视频监视器观测被测件在干扰场辐射下的工作情况。产品合格的一般判据可参见“电快速瞬变脉冲群试验”。

### 17.2.3.10 超短波频段电磁环境测试方法

为了有效、合理、经济和平等地使用有限的无线电频谱资源，使各类无线电业务互相兼容，正常工作，有针对地测试某些地域的电磁环境状况就显得尤为重要。

#### 1. 电磁环境测试的定义及分类

电磁环境普查电测：对特定地区的电磁环境摸底调查所进行的监测称为电磁环境普查监测，简称普查电测。

设台电磁环境测试：对新建无线电台（站）预选台（站）址或变更台址、变更频率进行的电磁环境测试称为设台（站）电磁环境测试，简称设台电测。

#### 2. 测试依据

##### (1) 法律法规依据

根据《中华人民共和国无线电管理条例》实施办法第四十五条（五）款之规定和《无线电监测与干扰处理程序》第 2.4 节。

##### (2) 技术依据

主要针对超短波频段，即频率在 30~1300MHz，测试依照国家标准 GB/T 14431—93《无线电业务要求的信号/干扰保护比和最小可用场强》。测试仪器满足测量干扰场强 GB6113—85《电磁干

扰测量仪》的要求。GB/T 14431—93《无线电业务要求的信号/干扰保护比和最小可用场强》对具体的频段的最小可用场强都有不同的规定，具体如下：

表 17-2 电视广播业务的最小可用场强

频段(MHz)	48.5~64.5	167~223	470~582	582~960
场强值 dBμV/m	48	55	65	70

17-2。

b. 对人口密度较低的农村。最小可用场强见表 17-3，数值均指地面之上 10m 高度处的场强。

c. 调频声音广播业务。

单声道广播:农村地区——48dBμV/m；城市地区——60dBμV/m；大城市地区——70dBμV/m。

立体声广播:农村地区——

表 17-3 电视广播业务的最小可用场强

频段(MHz)	48.5~64.5	167~223	470~582	582~960
场强值 dBμV/m	46	49	58	64

54dBμV/m；城市地区——66dBμV/m；大城市地区——74dBμV/m。

② 移动业务

a. 陆地移动业务。最小可用场强由下式决定：

$$E_{\min} = -41 + d + 20 \lg f \quad (17-3)$$

式中  $E_{\min}$  为最小可用场强 (dBμV/m)；-41 为对应于半波偶极子接收天线所折算的常数； $d$  为由人为噪声和多径传播影响所引起的接收质量的恶化量 (dB)； $f$  为有用信号的中心频率 (MHz)。

b. 航空移动业务。地面接收的最小可用场强为 26dBμV/m；机载系统接收的最小可用场强为 32dBμV/m。

c. 航空无线电导航业务。航向信标台工作频段为 108~111.975MHz，最小可用场强为 32dBμV/m；下滑信标台工作频段为 328.6~335.4MHz，最小可用场强为 52dBμV/m；指点信标台工作频段为 75MHz，最小可用场强为 64dBμV/m；全向信标台工作频段为 108~117.957MHz，最小可用场强为 39dBμV/m；超短波定向台工作频段为 117~150MHz 和 225~400MHz，最小可用场强为 39dBμV/m。

表 17-4 广播电视业务对陆地移动的最小可用场强和频率范围

场强 (μV/m)	频率范围 (MHz)
48	44~100
55	137~254
65	470~582
70	582~960

d. 无线电业务之间的防护。广播电视业务对陆地移动的最小可用场强和频率范围见表 17-4。

陆地移动对广播电视业务的最小可用场强和频率范围见表 17-5，表中的数值适用于频道间隔为 25kHz 的情况，对于频道间隔为 12.5kHz 的情况，表的相应值提高 3dB。

表 17-5 陆地移动对广播电视业务的最小可用场强和频率范围

频率范围 (MHz)	场强值 (dBμV/m)	
	信号质量等级	
	3 级	4 级
44~68	16	19
68~87.5	15	20
87.5~108	14	20
137~174	14	21
174~254	14	21
470~582	20	24
582~960	30	38

3. 测试准备

首先检查测试所需要的设备及其附件是否都工作正常，该充电或更换电池的要及时做好准备。若要知道所测信号的具体参数，以下几个方面都是必不可少的：馈线在各个频段的损耗；天线系数（因子）等。天线是选择全向还是定向，是有源还是无源天线，都是关心的重点。如果用滤波器，要知道滤波器在某些频点的插入损耗。

4. 测试步骤

(1) 普查电测

普查电测关心的是某一地域、某些频段电磁环境的状况。这种测试都是自动化程度较高的测试,这样不但可以节约大量的人力、物力和财力,还可以节约时间。一般来说,测试的对象针对是一段或多段频段的测量,指标包括各频段背景噪声场强、各频段频道占用参数(占用度、最大场强、最小场强)、典型干扰信号参数(频谱图、带宽、场强、声音等)。在测试过程中主要关心以下几个指标:频率、场强、频谱占用度和信道占用度、带宽和调制方式。

对于以上 5 个指标,为了得到更准确的第一手资料,建议测试点的选取应满足以下基本要求:周围环境相对较为开阔、测试点较被测区域高、避开近距离大功率无线电发射设备。在测试过程中,如果使用的是方向性天线,要有规律地转动天线的方位,以确保每个方位都能够面面俱到,都能够测出其最真实的数据。同时,统计测量结果,对占用中的已经支配的频率,统计其频谱占用度和时间占用度,对占用的未支配频率进行重点测试,分析并确定其干扰的类型、调制方式、场强大小、干扰方位等并记录在案,同时记录各频段在该测试点的噪声电平,绘制噪声电平曲线。干扰的类型一般有以下几种:同频干扰、邻道干扰、互调发射、杂散发射、强信号阻塞、工科医和非无线电设备产生的辐射干扰等。测试的时间根据国家的有关规定执行,一般应大于 24h。测试所需要的仪器有标准测试天线、电源线、转接头、馈线、高灵敏度频谱分析仪(或测量接收机)、配套计算机、打印机、GPS 等。

## (2) 设台电测

设台的目的是采集、记录、统计该预选台站址的电磁环境数据,判断其站址是否符合国家的有关标准、规定,为无委办公室审批台站和合理、有效指配频率提供技术依据。在该类测试中,分为多频段测量和单频点测量两种。所进行的测量都是开环测量,测试所需要的仪器与普查电测一样,只是所关心的指标重点有差异。

① 多频段测量。多频段测量的重点在频域的测量,一般地说,该测量主要针对信号的以下几个方面特征(一般机场的测量就属于此种类型):场强、频谱占用度、信道占用度和时间占用度。测试目的是为了对该地域的各个信道有准确的了解,找出未被占用的信道,作为有关部门频率指配的依据。

② 单频点测量。这是对指定频点或信道进行的测量。如果预选站址附近(500m)有电台,测量时特别要注意:加装可调滤波器(该滤波器测量前已经调到要测量频点或信道的频率上),以避免这些电台可能对测试系统产生的影响,达到准确测量的目的。

该种测量的主要技术指标为(一般情况的新设寻呼台站等都属于这种情况):场强、信道(频率)占用度,如果有干扰,测出其方位。测试的目的是为预指配的频率做进一步的确认。如果发现干扰,要及时查处;若暂时不能排除,则建议频率指配地有关部门进行调整,重新指配。

以上两种测试都要求测试接收天线的位置应尽可能地处在所设台天线的位置,这样测试的结果才可能更接近真实值。同时要求在测试的过程中,要有规律地转动测试天线,尽量使每个方向都能采集到数据。

## 5. 统计分析

统计,一般有两种情况:现场统计和事后统计。一般要求先作现场统计,并根据统计结果重点测量和分析占用度较多、信号较强的频率。两种统计的方法都一样,都是利用信号的实际场强与最小可用场强进行比较,小于最小可用场强的信道为可用信道,反之则为不可用信道。信号的实际场强  $E_{vi}$  由式 17-4 决定,即

$$E_{vi}=E_i+K+L_n+L_{cab} \quad (17-4)$$

式中  $E_{vi}$  为该信号的实际场强(dBμV/m);  $E_i$  为该信号在接收机上测得的电压电平(dBμV/m);

$K$  为天线系数(dB/m);  $L_{\text{fi}}$  为所用滤波器在该频点的插入损耗(dB);  $L_{\text{cab}}$  为所用馈线的损耗(dB)。

信号的最小可用场强见测试依据所列或参考国家标准 GB/T 14431—93《无线电业务要求的信号/干扰保护比和最小可用场强》。统计结果可用图形、数字、表格等多种形式表达出来。

## 17.3 电子设备调试检验实例

### 17.3.1 高压开关柜的整机检验与调试

对于高压开关柜来说, 每一个运输单元都应在制造厂内进行整机检验。高压开关柜的整机检验项目有: 外观检查; 主回路的工频耐压试验; 辅助回路和控制回路的耐压试验; 主回路的电阻测量; 机械操作试验; 机械特性试验; 辅助电气装置试验; 接线正确性的检验; 组件的互换性检验等。

#### 17.3.1.1 外观检查

外观检查的内容及方法如下:

(1) 门及面板的不平度检查。在每米范围内用直尺测量, 不得超过 3mm, 不到 1m 大于 0.5m 时, 不平度可按每米 3mm 比例算, 小于 0.5m 时, 则按 0.5m 计算。网状遮栏上的钢丝网应张紧, 以框的外表为基准, 用直尺测量, 其凹凸度不得大于 20mm。外露侧板应无明显的凸凹不平现象。

(2) 门与门及操作板紧邻两平行面之间间隙不得大于 3mm。

(3) 门锁上后, 测量门锁侧之上下角间隙, 最大不超过 3mm。

(4) 门开启灵活, 开启角度不小于 90°。在开启过程中不应使电器受到冲击或损坏油漆。

(5) 自正面观察门、面板、铰链等外露部分的焊缝应光洁均匀, 无焊穿、咬边、溅渣、焊药皮及气孔等现象。

(6) 检查柜体接地装置的触片或螺柱, 其上不应有流漆或黄锈, 并应标有明显的接地符号。

(7) 检查在同批产品中是否保证了漆色一致(包括对操动机构的罩壳和基座的漆色应与柜体表面漆色基本一致的要求), 色泽均匀, 无露底漆的现象, 漆膜应有良好的附着力; 所装电器组件也应无露底漆现象。检查的时候, 人距开关柜表面 1m 处用肉眼观察。

(8) 自正面观察, 柜体及可移开部件(即手车)的外露部分的涂漆不得有流痕、起皱、斑点、橘皮及杂物附着在上面。

(9) 检查高压开关柜上所有的电镀件(包括组件本身的电镀件)的镀层不得有起皮、脱落、发霉及生锈等现象。

(10) 检查母线的排列、漆色是否符合要求, 母线的排列安装应层次分明, 整齐美观, 涂漆色泽均匀, 同一组件的同一侧的各相母线端的涂漆界限应无明显的不整齐现象; 母线的连接处不得有沾漆。

(11) 检查母线接触面是否平整光洁, 连接处的边缘及孔口应无毛刺或凸凹不平现象, 连接紧密可靠, 并有防松装置; 母线的弯曲处应无裂纹, 需仔细检查。

(12) 检查辅助回路配线(即二次接线)应整齐美观, 并应符合有关工艺要求, 导线颜色符合有关规定, 二次线号牌清楚牢固。

(13) 检查绝缘导线穿越金属隔板时, 应有保护绝缘不致损坏的措施。

(14) 检查用以固定组件及连接导线的紧固螺钉是否拧紧, 并有防松措施。

(15) 检查产品内部是否清洁, 应无油污和杂物。

(16) 随产品出厂的技术文件应齐全，有按规定应附的备品备件。

17.3.1.2 主回路的工频耐压试验

由于开关柜系由很多组件装配而成，而这些组件已各自进行了相应的整机检验，因此，主回路的工频耐压试验是用来检验其组件相互连接后的绝缘性能。开关柜的主回路只进行干耐压试验（即干燥状态下的试验），进行试验时，应将母线上及电器上的灰尘擦净。其试验方法如下：

1. 对地和相间耐压试验

(1) 将试验变压器的接地端与开关柜的外壳相连，将断路器或其他主回路的开关合上，以保证回路的连通，并将避雷器等过电压保护组件拆开，电压互感器、变压器或熔断器可由模拟品代替。

(2) 然后依次将每一相的主回路导体与试验电源的高压接线端连接，而其他各相主回路导线和辅助回路导体应与接地导体或支架相连，并与试验电源接地端连接。电流互感器、直动式过流继电器或过流指示器应按正常工作装设。

(3) 合上试验电源均匀升压到规定值，历时 1min，无闪络和击穿现象即为合格。试验电压值按表 17-6 中断路器一栏中选取（以下相同）。

表 17-6 高压电子设备绝缘的交流耐压试验电压标准

额定电压 (kV)	最高工 作电压 (kV)	交流耐压试验电压 (kV)													
		电力变压器		电压互感器		断路器、电流 互感器		隔离开关和干 式电抗器		支持绝缘子和套管				干式变压器	
										纯瓷和纯瓷充油绝缘		固体有机绝缘			
		出厂	交接	出厂	交接	出厂	交接	出厂	交接	出厂	交接	出厂	交接	出厂	交接
0.4 及以下	3.5	5	4											3	2
3	6.9	17	15	24	22	24	22	24	24	25	25	25	22	10	8.5
6	11.5	25	21	32	28	32	28	32	32	32	32	32	28	16	13
10	17.5	35	30	42	38	42	38	42	42	42	42	42	38	24	20
15	23	45	38	55	50	55	50	55	55	57	57	57	50	37	31
20	40.5	55	47	65	59	65	59	65	65	68	68	68	59		
35		85	72	95	85	95	85	95	95	100	100	100	90		

(4) 对主回路带电部分与观察窗之间的绝缘，及主回路带电部分与绝缘隔板、活门的可触及表面之间，也应能承受主回路对地和相间的试验电压。试验时，在操作和维护时可能触及的观察窗、绝缘隔板和绝缘活门表面上，在最不利的位置覆盖一块接地的圆形或方形金属箔，其面积应尽可能大些，但不能超过 100cm<sup>2</sup>，当不能确定何处为最不利位置时，试验应在几个不同的位置重复进行。

2. 隔离断口之间耐压试验

(1) 主回路的各隔离断口之间，也应施以对地和相间相同的试验电压进行耐压试验。这里所说的隔离断口（如手车柜隔离触头，也包括隔离开关断口），主要是指主回路中可抽出或可移开的开关所连接的两个部分之间的距离。在隔离断口固定部分与抽出部分之间，没有接地的金属活门或隔板，则隔离断口之间的试验电压按下列要求施加：

① 若可抽出部件的主回路导电部分可被意外地触及，则电压施加在固定触头与活动触头之间。

② 若可抽出部件的主回路导电部分，不可能被意外地触及，则电压施加于同相的两固定触头之间，可抽出部件的开关是接通的。

(2) 隔离断口之间，如果在断开位置，有一个接地的金属活门插在被分开的两触头之间形成一个“分隔”，则在接地的金属活门与带电部分间的距离仅应承受对地的试验电压。

3. 其他耐压试验

(1) 主回路带电部分和绝缘隔板、活门的内表面之间，至少应能承受 150%的额定电压。试验方法：用一块不大于 100cm<sup>2</sup> 的圆形或方形接地金属箔附于绝缘隔板、活门的内表面，朝向带电体，进

行工频耐压试验, 试验电压为 150%额定电压, 时间为 1min。

(2) 用户如有特殊要求, 除制造厂进行整机检验外, 可以在现场安装后进行 80%额定电压的绝缘试验。

(3) 进行耐压试验时应注意人身安全, 要按下列安全措施进行:

① 试验现场应装设遮栏或围栏, 向外悬挂止步、高压危险的标示牌并派人看守, 被试设备两端不在同一地点时, 另一端还应派人看守。

② 接地线应用截面不小于  $25\text{mm}^2$  的多股软裸铜线, 并不得有断股现象。

③ 因试验需要断开电器设备接头时, 拆前应做好标记, 恢复连接后应进行检查。

④ 试验装置的金属外壳应可靠地接地, 高压引线应尽量缩短, 必要时用绝缘物支持牢固, 为了在试验时确保高压回路的任何部分不对接地体放电, 高电压回路距接地体(如墙壁、金属围栏、其他设备等)的距离必须留有足够的裕量。

⑤ 加压前必须认真检查试验线、表计倍率、调压器零位及仪表的开始状态均正确无误, 通知有关人员离开被试设备, 方可加压; 加压过程中应有人监护。试验人员在加压过程中, 应精力集中, 不得与他人闲谈, 随时警戒异常现象发生。操作人员应站在绝缘垫上。

⑥ 试验结束时, 应首先断开试验电源, 放电, 并将升压装置的高压部分短路接地。

#### 17.3.1.3 辅助回路和控制回路的绝缘试验

开关柜的辅助回路和控制回路应能承受试验电压为 2kV 历时 1min 的耐压试验。试验方法:

(1) 将辅助回路和控制回路连接在一起, 试验电压加在它和接地骨架之间。

(2) 如有可能, 正常使用中与其他部分绝缘的每一部分回路作一极, 其他各部分连接至接地骨架作为另一极, 电压加于二者之间。

若各次试验皆无击穿放电现象, 则认为通过。辅助回路和控制回路中的电动机, 其试验电压应与回路相同, 若这些组件已按规定的技术条件进行试验, 在试验时可以从回路中拆开。辅助回路和控制回路中使用有电子器件时可把电子器件拆开。对电子器件的耐压值为 1 000V 历时 1min。电流互感器的二次侧应短接并与地断开、电压互感器的二次侧应断开。

#### 17.3.1.4 主回路电阻的测量

测量开关柜的每一相主回路电阻, 主要是检查开关柜母线各连接头的连接质量, 以便与已经作过温升试验的开关柜相对比。测量开关柜主回路电阻是间接地做开关柜的温升试验, 因主回路的温升是与主回路的电阻直接相关的, 在通过相同电流的情况下, 主回路电阻越大, 温升就越高。反之, 主回路电阻越小, 温升就越低。而做温升试验比较麻烦且不易做, 需要大电流发生器, 耗能也大, 因此在同类型开关柜中, 凡做过温升型式试验合格, 而测得的其主回路电阻值, 那么就以此值为基准, 所有此类型的开关柜, 其主回路的每一相电阻值不大于基准值的 1.2 倍, 都可以认为其温升试验是合格的。

主回路电阻的测量方法有两种: 直流压降法和直接测出法。

##### 1. 直流压降法

直流压降法的理论根据是欧姆定律  $R=U/I$ , 即在被测试开关柜的主回路上通以直流电流, 电流一般为 100A, 用多量程的毫伏-伏特表测量主回路的电压降, 然后算出电阻。注意测量时应从柜顶的母线末端到柜底的母线末端侧, 即跨越开关柜的主回路, 这才是测得正确的主回路电阻值的方法。

输出的直流电流源可以用蓄电池组或者整流稳压器, 整流稳压器的输出脉动系数不大于  $\pm 3\%$ 。



## 2. 直接测出法

### (1) 对电桥的要求

直接测出电阻法是用双臂电桥进行测量的。电桥应符合下列要求:

- ① 电桥的精密度不低于 0.5 级。
- ② 检流计灵敏度: 当电桥平衡时, 改变可变电阻臂电阻的 0.5%, 其偏转不小于 1 格。
- ③ 用以连接电压端的接线电阻不应大于  $0.02\Omega$ 。

用双臂电桥进行测量时, 注意电流引线  $C_1$

(如图 17-37 所示) 要接在外侧, 电压引线接在电流引线接头内侧, 此两接头务必接触良好。接线卡子可采用汽车蓄电池卡子。如果将双臂电桥的电流端钮与电压端钮连在一起后, 引出两根线与被测电阻相接, 就使双臂电桥的准确度降低到单臂电桥的水平了, 因为此时接线电阻和接头电阻都被测进去了, 显然这是不允许的, 所以必须注意将电桥的电流和电压端钮分别用四根线与被测电阻对应连接。测量时仍应从柜顶的母线末端到柜底的母线末端测。

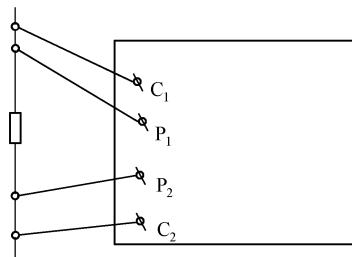


图 17-37 双臂电桥测量电阻时的外部接线示意图

### (2) 电桥操作注意事项

对电桥的使用操作, 除了按使用说明书的要求进行外, 还应注意以下几点:

- ① 连接线与被测电阻的接触面要清洁, 以尽量减少接触电阻。
- ② 电桥需要外接电源时必须注意极性, 并应先连接“-”端。
- ③ 测量时, 先按下电源按钮, 后按检流计按钮, 测完后, 必须先放松检流计按钮, 后放松电源按钮。
- ④ 改变被测对象时, 应先断开电源。
- ⑤ 测试完毕后, 应将检流计上的锁扣锁住。

### 17.3.1.5 机械操作试验

机械操作试验是为了证明开关和可移开的部件能完成预定的操作功能, 且机械联锁也是可靠的。主回路不通电, 对开关在规定的操作电压极限范围的操作性能, 及合闸、分闸、自动重合闸等操作的正确性进行验证。具体如下:

(1) 主回路所装的每一个开关(包括断路器、负荷开关、隔离开关、高压接触器等)应从开关柜的安装顺序从上到下依次进行合、分闸各 5 次的操作试验。

(2) 依靠外来能源进行操作的开关(如利用电磁操动机构、弹簧操动机构进行操作)合、分闸各 5 次的试验可按以下进行:

① 直流为 80% 额定合闸电压, 交流为 85% 额定合闸电压, 合闸 5 次。用 120% 额定分闸电压分闸 5 次。

② 110% 额定合闸电压合闸 5 次, 65% 分闸电压分闸 5 次。

(3) 对兼有能手动合闸的断路器, 还应用手动进行 3 次合、分闸操作。

(4) 对具有自由脱扣装置的断路器, 用手动使其操作机构的合闸驱动组件到达合闸顶点位置时, 通以 65% 额定操作电压, 应能脱扣, 试验 3 次均正常。

(5) 断路器合闸后, 施以 30% 额定分闸电压连续操作 3 次, 应不脱扣。

(6) 对开关柜的可移开部件进行抽出、插入的试操作不少于 5 次。如手车式高压开关柜, 单台高压柜的手车在原配高压柜中推入、抽出不应少于 5 次。

(7) 对具有欠压脱扣装置的断路器, 通以欠压脱扣电压, 应能可靠脱扣, 试验 3 次均正常。

(8) 对具有过流脱扣装置的断路器, 在试验线路通以规定的过电流, 应能可靠脱扣, 试验 3 次均正常。

(9) 对具有重合闸性能的断路器, 要求断路器在事故跳闸后, 应能自动重合闸一次, 若为暂时性故障, 要求断路器不再跳闸, 恢复正常供电; 若这永久性故障, 要求断路器再度跳闸, 以便检修, 其循环为: 分闸→触头不接触→时间大于 0.25s→合闸→金属短接时间不少于 0.09s→分闸。试验三个循环均正常(配合重合闸继电器模拟故障进行试验)。

(10) 机械连锁试验。试验时, 施加正常的操作力, 且不允许对开关、可移开部件及联锁装置进行调整, 如果满足下列条件, 则认为连锁是可靠的:

- ① 开关不能被操作。
- ② 可移开部件的抽入与抽出被阻止。
- ③ 开关、可移开部件及联锁装置具有正常的工作程序, 并且试验前后的操作力基本相同。

#### 17.3.1.6 机械特性试验

开关柜的机械特性试验, 是指其主回路中所装的断路器及操作机构、负荷开关、接触器等在规定的操作电压范围内, 其机械特性参数应符合该产品技术条件的要求。如断路器的分闸时间、合闸时间、分、合闸不同期性, 分、合闸速度, 行程等均应符合断路器技术条件要求。开关柜机械特性试验中对于断路器而言主要内容有:

(1) 断路器分、合闸时间的测量。

(2) 断路器分、合闸速度的测量(断路器在整机检验时已经经过此项试验, 因此装于开关柜后, 一般不进行此项试验)。

(3) 断路器分(合)闸不同期性及行程的测量。

#### 17.3.1.7 辅助电气装置试验

开关柜的辅助电气装置系指除主回来以外的所有控制、测量、信号和调节回路的电气装置, 它们的整机检验与一定操作程序的控制装置在一起, 在辅助能源最下利的限值下, 按规定的使用和操作条件连续试验 5 次, 试验中不得调整。一般情况下, 辅助电气装置的整机检验可有自动断开操作电源的辅助接点试验、防跳试验、失压或过电流脱扣试验等几项。

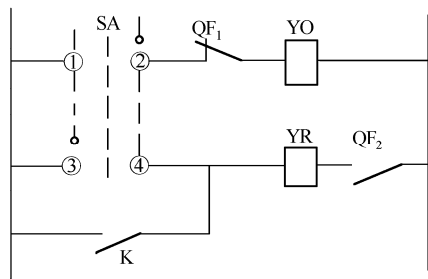


图 17-38 断路器的分合闸控制回路

##### 1. 自动断开操作电源的辅助接点试验

高压开关柜自动断开操作电源的辅助接点主要有两对, 见图 17-38 的  $QF_1$  和  $QF_2$ 。其中, SA——控制开关;  $QF_1$ 、 $QF_2$ ——辅助触点; YO——合闸线圈; YR——分闸线圈。

辅助接点的动作时间应能满足下列要求:

(1) 用于跳闸回路的辅助接点, 应在开关主触头开始断路行程之后断开, 同时在开关合闸行程最初开始时闭合, 在跳闸时, 辅助接点过早断开可能会造成开关拒绝跳闸。

(2) 用于合闸回路的辅助接点, 应在开关合闸行程最终端时断开。

(3) 辅助接点的调整可在手动缓慢合闸和分闸时进行, 调整方法通常是变更操作机构与辅助开关接点环的角度或杠杆的长度; 接点调整后, 必须重复进行校验。

## 2. 防跳试验

防跳试验, 是指开关柜所配电动操作机构, 当外来合闸指令一直存在, 同时又接到分闸指令时, 能防止开关分闸后再度合闸装置的试验。断路器如果出现多次的“跳-合”现象, 会造成损坏事故扩大, 所谓“防跳”就是采取措施防止断路器“跳跃”的发生。防跳装置可分为机械防跳及电气防跳两种, 对高压开关柜来说, 所配电磁操作机构与弹簧储能操作机构一般都没有机械防跳装置, 而是以电气防跳为主。

## 3. 交流失压和过电流脱扣器试验

(1) 高压开关柜所配用的手动操作机构, 可具有自动脱扣机构, 其脱扣器类型有以下 4 种:

- ① 瞬时过电流脱扣器——作为过载及短路时保护用。
- ② 延时过电流脱扣器——作为过载及短路时保护用。
- ③ 失压脱扣器——当网络电压降落时保护用。
- ④ 切断电磁铁——用于所有可能的保护(由各种电源通过带有可闭合触头的继电器来操作)。

(2) 对于过电流脱扣器, 其保护接线方式一般有两种:

- ① 直接动作式, 用操动机构内的瞬时过电流脱扣器构成。
- ② 去分流式, 用 GL 型继电器构成带反时限特性的过载保护和短路电流速断保护。

(3) 试验方法: 将电流互感器二次端子拆开, 接入模拟电流发生器, 如图 17-39 所示, 然后通入电流。每级脱扣电流动作的准确度在  $\pm 10\%$  范围内, 延时脱扣装置带有时限机构, 其动作时间的调节范围为  $0 \sim 4\text{s}$ 。

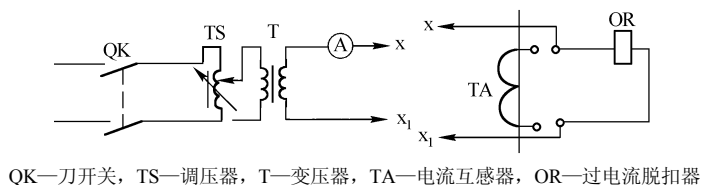


图 17-39 模拟电流实验接线图

对于失压脱扣器线圈, 试验时可将其串接在调压器输出的两端上, 然后调节调压器, 当电压降至额定电压的  $85\%$  时, 失压线圈不应脱扣; 当电压降至额定电压的  $65\%$  以下时, 失压线圈必须脱扣动作。对于分闸电磁铁, 试验方法与失压脱扣线圈相同, 当线圈端钮电压为额定值的  $65\% \sim 120\%$  范围时, 应可靠分闸; 当线圈端钮电压小于额定的  $30\%$  时, 应不得分闸。

### 17.3.1.8 手车式高压开关柜的互换性检查

手车式高压开关柜多台并列, 每台手车应在其他台相同高压手车柜中推入, 抽出不少于一次。每次推入抽出均应检查一次插头有无插偏, 二次插头接触是否良好, 机械联锁装置动作是否可靠, 安全隔离板是否随进出而相应地动作等。

## 17.3.2 低压开关柜的整机检验

低压开关柜的整机检验项目有: 一般检查; 通电操作试验; 耐压试验; 保护措施和保护电路

的检查。

### 17.3.2.1 一般检查

低压开关柜的一般检查的主要内容：检查开关柜所安装的测量仪表、保护继电器及电器设备等是否有出厂检验合格证或相应的标记；检查零部件加工、焊接、骨架结构、喷漆质量及测量仪表、保护继电器、电器设备等安装质量，检查联锁装置、母线连接、二次配线等是否符合要求。具体可按下列步骤进行：

(1) 观察需要操作的电器，操作高度不高于 1.9m，不低于 0.4m。

(2) 门应来回转动各 5 次，检查有无卡住、碰坏电器及磨掉漆等现象。

(3) 对于具有手动操作的开关，应用于操作分、合各 5 次，检查有无卡住、销子脱落、定位不准和操作力过大等现象。

(4) 检查跨越门的连接线是否采用多股铜导线，是否有足够长的余量。

(5) 核对检查安装组件，按照从上至下，从左到右，从外到里的顺序逐个检查各组件是否符合图纸规范，安装是否符合要求，各组件的标志牌是否清晰。

(6) 检查 A、B、C 三相母线的颜色及二次导线的颜色是否符合要求；检查组件带电体与带电体，带电体与金属骨架之间的电气间隙和爬电距离；检查母线接触面是否接触良好。

(7) 对于抽屉式低压开关柜，每台抽屉均应在原配小室中推入、抽出不少于五次。每台抽屉还应在其他相同规格的小室中推入、抽出各不少于一次，以进行互换性检查，每次推入、抽出均应检查一次触头有无插偏、二次触头弹性是否足够，接触是否良好，联锁装置动作是否正确可靠。

### 17.3.2.2 通电操作试验

低压开关柜的通电操作试验，主要是验证柜内所装的低压电器是否符合它本身的操作要求和保护特性。试验时应根据其规定的最高工作电压、最低吸引电压、释放电压以及电流范围通电操作，验证电器闭合和断开操作的可靠性。

对于低压电器来说，根据 GB1197 规定，一般电磁操作和电动操作的电器，应在控制电源电压额定值的 85%~110% 范围内均能可靠地动作；释放电压不应大于额定电压的 75%，不低于额定电压的 20% 范围内的（直流不低于额定电压的 10%）应可靠释放。另外，通电操作试验于额定电压的 20% 范围内的（直流不低于额定电压的 10%）应可靠释放。另外，通电操作试验还应验证电流脱扣器或电流动作的继电器是否符合它所规定的动作范围，各种仪表是否指示正确。

进行通电操作试验，应按设计原理图进行，对辅助电路应模拟正常使用情况进行，控制按钮、限位开关等应模拟接入试验电器。一般通电试验程序是：电器的吸合和释放动作试验；电器的保护特性试验；仪表指示试验。

#### 1. 电器吸合和释放动作试验

有许多低压电器，例如接触器、自动开关中的电磁脱扣器、失压脱扣器等，都是用电磁机构来操作的，而电磁机构能否准确无误地吸合与释放是这些电器能正常工作的首要条件，这就是电器的操作要求，试验时主电路不通电，控制电路分别通以控制电压的上限值和下限值进行闭合和断开操作试验。

##### (1) 吸合电压试验

交流吸合电压试验所用的电流一般都直接取自电网的工频交流电源，试验电路如图 17-40 所示。图中 TS 是接触式自耦调压器，应避免采用感应式调压器，因感应调压器的输出电压波形畸变比

较严重, 内阻抗也较大, 不宜于动作试验。

图 17-40 所示的试验电路对容量小的交流电磁线圈比较理想。对容量较大的电磁线圈, 如额定电流较大的交流接触器吸引线圈或交流电磁铁, 一般起动电流可达稳态电流的 10 倍以上, 因此要求电源和调压器的容量也要相应增大, 以保证电磁线圈起动瞬间试验电压仍能保持近似恒定, 按国家标准规定: 接通线圈电源后, 要求电源电压波动相对于空载电压而言小于 5%。

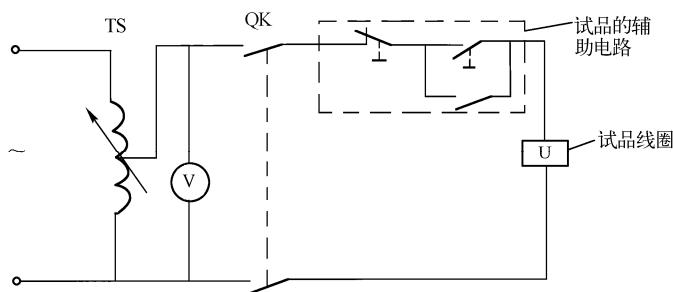


图 17-40 交流吸合电压试验电路之一 (TS—调压器, QK—刀开关)

试验时将空载电压调节至标准规定的电压动作上限值或下限值, 然后瞬时施加于试品线圈上, 能吸合的试品就是合格品。注意, 试验中不是先接通线圈线路再逐步增加电压的, 而是将电压瞬时加到线圈上, 这种方法与电器实际使用的情况相符。对于三相电动机合闸的自动开关, 其要求和试验方法与上述相同, 只不过试验电源为三相。

## (2) 释放电压试验

交流释放电压试验所用的设备和试验电路与交流吸合电压试验相同。试验时, 要求将电压从额定值起连续降低直至释放, 读取刚释放时的电压值。具体方法是: 先加上电压使试品吸合, 将电压调至线圈额定电压, 再逐步降低电压至释放。因为起始电压高, 磁系统剩磁也大, 衔铁不易释放, 试验也较为可靠, 对于带有欠电压继电器和带有欠压脱扣器的电器, 当电压缓慢下降到额定电压的 70%~35% 范围内, 电器的欠压继电器或欠压脱扣器应动作, 使电器断开 (零电压脱扣器是欠电压脱扣器的一种特殊形式, 其动作范围在额定电压的 35%~10% 范围内), 当电源电压低于欠压继电器或欠压脱扣器额定电压的 35% 时, 欠压继电器或欠压脱扣器应保证开关电器不能闭合, 当电源电压等于或高于额定电压的 85% 时, 欠压继电器或欠压脱扣器应保证开关电器可靠闭合。

## 2. 保护特性试验

低压开关柜在配电中的保护功能主要是当线路发生故障时 (如过载或短路) 切断线路, 这些保护一般是通过过电流继电器和自动开关的电磁脱扣器的动作来实现保护功能的 (也可用熔断器进行保护)。而这些保护装置有些又具有延时功能, 包括反时限延时和定时限延时等, 为了验证它们的保护功能是否可靠、准确, 因而必须对它们进行模拟事故状态试验, 即验证它们在事故状态下的动作情况。

### (1) 过电流继电器的吸合与释放电流试验

过电流继电器试验线路如图 17-41 所示, 由于吸合电流试验要求在试验过程中电流必须保持一定程度的恒定不变, 图中串接的电阻  $R$  就是起保持试验电流比较恒定的作用。  $R$  越大在动作过程中电流变化将越小, 但外加电压越高。  $R$  是采用高阻合金绕的变阻器,  $T$  是降压变压器。

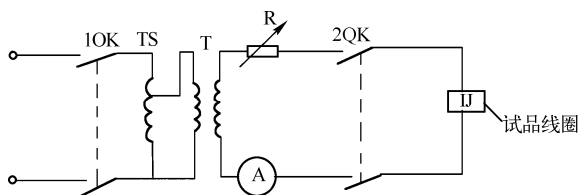


图 17-41 过电流继电器的动作试验接线图

试验时应依据电气原理图，接好所有控制电源线，使全部电器处于模拟工作状态（主回路不通电），然后拆下电流互感器二次侧端子，将试验电源与其接线连接，然后闭合开关 1QK，调压器 TS 从零逐渐加压，直至试验电流增至试品吸合为止，从电流表读取刚吸合时的电流，此电流称为动作电流  $I_{DZ}$ ，这个动作电流值与整定值误差不应超过  $\pm 3\%$ ，电流继电器动作应检查控制系统的保护动作程序是否符合要求。释放试验时，把电流从整定的最大值逐渐下降至释放，释放的电流值称为返回电流  $I_{FH}$ ，而返回系数为：

$$K_{FH} = I_{FH} / I_{DZ} \quad (17-5)$$

电流继电器的返回系数在  $0.8 \sim 0.9$ 。对于电磁型电流继电器，动作值与返回系数的调整，可以用调整继电器的舌片和弹簧来达到要求。对于感应型电流继电器，如 GL10 系列电流继电器，检测整定插孔下感应组件的动作电流和返回电流，要求动作电流与整定值误差不超过  $\pm 5\%$ ，返回系数为  $0.8 \sim 0.9$ 。试验时方法与上述相同，仍按图 17-41 的试验线路，平滑地通入电流，使继电器的扇形齿与蜗杆啮合，并保持此电流值直到继电器触点动作，该电流即为继电器的动作电流。若动作电流与整定值误差超过  $\pm 5\%$  时，可调整继电器的拉力弹簧使之满足要求。

## (2) 过电流电磁脱扣器脱扣试验

自动开关中一般都装有过电流电磁脱扣器，当电流发生过载或短路故障时，此脱扣器应立即动作把自动开关断开。做脱扣试验时，原则上是把装有脱扣器的自动开关通以规定的试验电流。此电流同时通过与自动开关串接的脱扣器电磁线圈，当衔铁吸合并带动脱扣机构使自动开关断开；自动开关断开后，把通过电磁脱扣器的电流分断，脱扣器的衔铁应立即返回原位。

过电流电磁脱扣器的脱扣试验有单相单极和单相多极脱扣两种。单相单极脱扣试验，是指试验电源是单相的，单极是指试品是单极进行试验的；单相多极脱扣试验，是指自动开关的三极或二极，用同一单相电源试验。图 17-42 (a) 是单相单极脱扣试验电路；图 17-42 (b) 是单相多极脱扣试验电路。

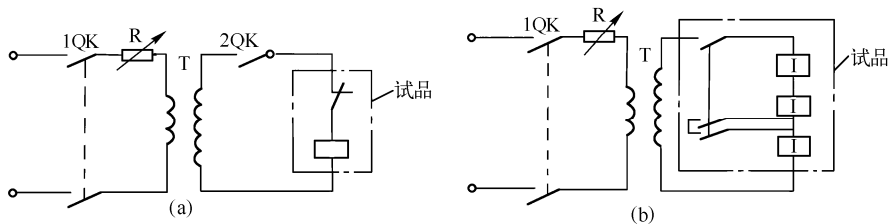


图 17-42 过电流脱扣器试验电路

如果试品是单极的，只要进行单相单极脱扣试验；如果试品是多极的，应进行单相多极脱扣试验。试验时，试验电流可从小逐渐增大至试品脱扣，也可预先调节 R 至预定试验电流，然后瞬时接通电路进行脱扣试验。电流从小开始逐渐增大至试品刚脱扣试验方法的优点：一是可用电流表直接读取每次的脱扣电流值，二是试验电流中不包含非周期分量电流。对于预先调节至预定的脱扣电流，然后瞬时接通电路的试验方法，其优点是与实际使用情况一致，缺点是试验电流中有非周期分量。

过电流电路脱扣器试验合格的判定根据：实测脱扣电流应不大于额定整定电流的上偏差和不小于额定整定电流的下偏差，二者都必须达到。例如，脱扣器的额定整定电流为脱扣器额定电流的 10 倍，设为 1 000A，允许的上、下偏差均为额定整定电流的 10%，则实测脱扣电流如不大于 1 100A，实测不脱扣电流不小于 900A，就认为该开关的过电流保护是合格的，如有一个偏差超出，就是不合格，要重新调整后再试验。由此可知脱扣器的额定电流仅是一名义值，实测脱扣电流与额定整定电流一般是不会完全一致的，脱扣电流总是稍大于整定电流。

3. 仪表指示试验

仪表指示试验要模拟实际运行情况接入试验电压和电流（电流应从电流互感器二次侧供给），在通电以前，先对仪表进行一般性检查，仪表的检查项目有：

- (1) 仪表的外壳、玻璃、端子、刻度盘、指针、零件调节器等应完整、清洁。
- (2) 仪表内部无脱落的零部件或其他部件。
- (3) 仪表应有必要的标志和符号，安装位置符合图纸要求。
- (4) 指针的位置应正确。

上述检查无异常现象后，即可通电检查，将仪表接入模拟试验线路后，平稳地增加被测量值（如电压值、电流值等），使指针从零位偏转至测量值上限，然后缓慢地减少测量值至零，在此过程中观察：

- (1) 可动部分的转动是否灵活。
- (2) 当平稳地减少被测量值至零时，指针是否回零位。
- (3) 在刻度的某部分上，指针有无谐振性振动（指针端部的振幅不应大于最细刻度线的宽度）。
- (4) 电度表有无反转现象。如有异常现象应找出原因，排除故障后应重试，直到全部符合要求为止。

17.3.2.3 耐压试验

低压开关柜的耐压试验是验证柜内各部分的电气绝缘性能是否符合要求，每台开关柜必须根据各电路的额定绝缘电压分别进行耐压试验，如果没有击穿和闪络现象，则认为耐压试验合格。试验电压要求是：开关柜中主电路和与主电路直接连接的辅助电路（亦即接触器的控制电路等）应能承受表 17-7 所列的交流工频耐压试验值（有效值），历时 1min 无击穿或闪络现象。

试验前，对于不属表 17-7 规定承受耐压范围的二次回路，应将其二次回路拆开。试验电压施加于所有带电部件与框架之间和各相之间。用绝缘材料制造的操作手柄，耐压试验应单独进行。耐压施加在带电部件与金属箔裹缠的手柄之间，试验电压为该电路试验电压的 1.5 倍，进行这项试验时，框架不应接地，也不应与其他电路相连接。

开关柜中不与主电路直接连接的辅助电路，如果通过电压互感器或电流互感器或其他电器连接的辅助电路，应能承受表 17-8 规定的工频耐压值，历时 1min 而无闪络或击穿现象。试验电压施加于所有带电部分与框架之间。

表 17-7 交流工频耐压试验值

额定绝缘电压 $U_i$ (V)	试验电压 (V)
$U_i \leq 60$	1 000
$60 < U_i \leq 250$	2 000
$250 < U_i \leq 500$	2 500

表 17-8 辅助电路工频耐压试验值

额定绝缘电压 $U_i$ (V)	试验电压 (V)
$U_i \leq 12$	250
$12 < U_i \leq 60$	500
$2U_i > 60$	$2U_i + 1\,000$ 但不小于 1 500

17.3.2.4 保护措施和保护电路的检查

保护措施和保护电路的检查，主要是对开关柜在正常使用时和事故状态下防止人身触电措施的一般检查。主要有以下几项：

- (1) 对于抽屉式低压开关柜，应检查联锁开关与门构成的联锁，使得只有在电源开关断电以后才能开门；反之，门开着时电源开关不能合闸。
- (2) 每个抽屉都应有接地措施。
- (3) 检查当开关柜的门或盖上装有超过 60V 的电器时，门或盖上按规定应有接地点，并用导线与骨架相连接，导线截面应不小于从电源到门上电器连接线的最大截面。
- (4) 主接地点附近标有接地符号。

17.3.3 控制屏（台）的出厂检查试验

在电力系统二次回路中，常把所有二次回路的主令开关、按钮、仪表、指示灯等集中安装在控制屏上或控制台上，便于人操作和监视，而把所有各种保护继电器集中装在另一些屏上，称为保护屏。这些控制屏、控制台、保护屏等电气成套设备简称控制屏（台），这些控制屏（台）一般都是一次性生产，因而不进行型式试验，而仅进行整机检验。

17.3.3.1 外观和性能检查

1. 外观检查

- (1) 检查屏架结构的外形尺寸、垂直度、屏面的平面等要符合技术要求。
- (2) 检查漆膜是否有砂粒、起皱、流漆、斑点、气泡、丢色和露底等缺陷。
- (3) 检查屏（台）面板上模拟母线颜色与电压等级是否符合表 17-9 的规定；检查模拟母线的宽度（12mm）及模拟图形的画法是否符合规定的画法。

表 17-9 模拟母线颜色

序 号	运行电压（kV）	颜 色	序 号	运行电压（kV）	颜 色
1	直流电压	褐色	7	交流 10	绛红
2	交流 0.1	浅灰	8	交流 35	鲜黄
3	交流 0.23	深灰	9	交流 60	橙黄
4	交流 0.4	黄褐	10	交流 110	朱红
5	交流 3	深绿	11	交流 154	天蓝
6	交流 6	深蓝	12	交流 220	紫

(4) 检查组件的安装质量。按照屏（台）的安装接线图，检查各组件的型号、规格是否正确，各组件是否备有产品合格证，用眼睛观察屏（台）面的安装组件是否横平竖直，有无外观碰伤等。

(5) 检查屏后安装的组件有无悬吊现象，检查应设绝缘底板进行安装的组件是否符合要求。

(6) 检查导线的颜色是否符合二次线导线颜色的规定，采用的线径是否正确。用行线槽配线的产品，应检查行线槽的出线口是否光滑、无尖棱，行线槽固定牢实；用绑线法配线的产品，



线束的配置是否横平竖直。

(7) 检查导线连接正确与否。用通灯或其他接通指示器对连接点进行检查,看导线的连接是否与安装线图的要求相符,检查时应逐一进行,不可遗漏。

(8) 检查每根导线的端头是否都套有标号牌,其标号是否与安装接线图相符。

(9) 用钢板尺检查导线束与屏板之间的距离是否足够。

## 2. 机械性能检查

(1) 对带有门及翻板等可动部分的构架,应模拟使用情况检查其机械性能,把门或翻板启闭五次,检查开启角度的大小,最大开启位置时有无磕碰组件现象,启闭过程中有无发卡,关闭后门锁是否好用等。

(2) 对屏(台)上安装的按钮、主令开关等操作用组件,要进行模拟操作实验,操作次数不小于五次,若发现不正常应找出原因进行返修。

### 17.3.3.2 整组联动试验

整组联动试验是进一步检查产品是否符合原理设计图要求的手段。通过试验,除能发现经导线检查后可能还有的错误接线遗留之处外,而且可以发现安装接线图中所有存在的问题,甚至是原理设计上的漏洞。整组联动试验电源设备应能提供交流三相可调电压源、可调电流源、以及 220V、110V、48V 的直流电源。图 17-43 是整组联动试验电源原理图。

试验电源应符合下列要求:

(1) 交流电压幅值的变化应不大于额定值的 80%~110% 范围。

(2) 交流电源频率的变化应不大于  $\pm 0.5\text{Hz}$ , 如有对频率敏感的组件,还应符合组件的要求。

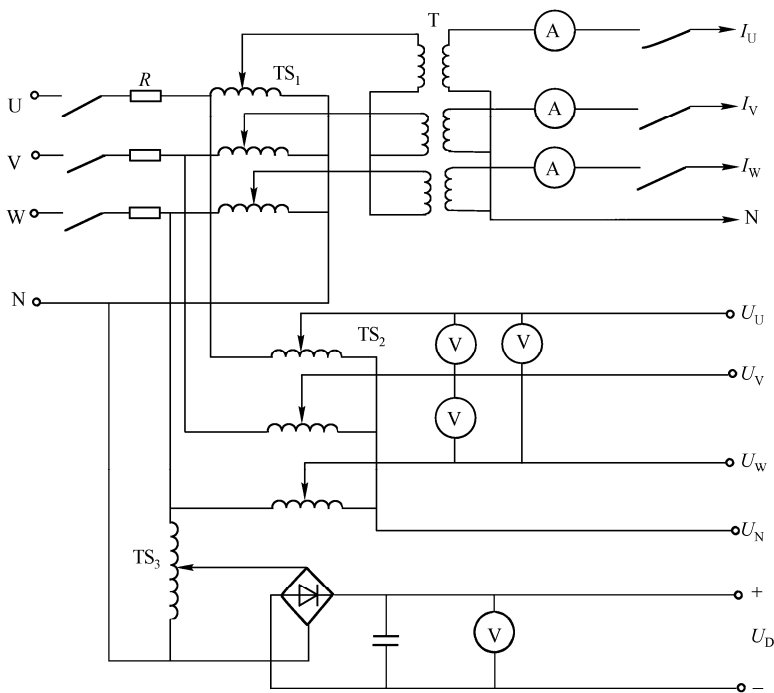


图 17-43 整组联动试验电源原理图

(3) 直流电压幅值的变化应不大于额定值的 90%~110% 范围。

(4) 直流电压的纹波系数应不大于 5%。

由于控制屏(台)是一次性生产,各屏(台)根据不同的使用情况设置不同的控制和保护回路,因此,整组联动试验应根据原理展开图进行。

### 1. 整组联动试验项目

归纳起来,整组联动试验包括下述内容:

(1) 确定继电保护装置和自动装置接线是否与原理接线图相符合,并检查有无寄生回路存在。

(2) 检查所有继电器(由动组件到出口组件),按相及按套(例如保护相间及单相短路,以及主保护和备用保护等)的动作及动作顺序(必要时还有时间配合)是否正确,并检查它们的相互配合情况。当两套保护装置有共同的继电器时,应在该共享的继电器处于各种可能的情况下检查两套保护装置的相互动作。

(3) 检查在模拟各种故障情况下,接线回路动作的正确性;对某些保护装置,还应检查由一种保障转变为另一种故障时的动作情况。

(4) 在运行中改变可能改变接线或改变保护装置整定值用的切换开关等的位置,检查接线回路的动作是否正确。

(5) 检验闭锁装置动作的可靠性,例如电压回路断线闭锁装置等。对所有闭锁装置均应模拟实际可能的各种情况,分别进行实验。

(6) 检验自动重合闸及备用电源自动合闸装置,模拟永久性短路时上述装置的动作次数,检验同期鉴定和无电压鉴定装置等对自动重合闸的闭锁作用,检验带前加速或后加速保护装置的自动重合闸的相互动作,以及其他按设计原理要求进行的相互动作检验。

(7) 对于按钮、操作开关等操作组件,应在原理线路图上规定使用的所有操作位置上操作不少于 2 次,检查其接点的通断情况及动作程序是否符合原理线路图的要求。

(8) 检查各种信号的动作情况

① 检查监视继电保护装置和自动装置状况的信号工作情况。

② 检查动作于信号的保护装置,其信号的显示情况,例如,瓦斯保护信号及过负荷信号等。

③ 模拟各种不正常方式,如熔断器熔断、跳闸与合闸回路断线、直流电压消失及其他不正常情况等,以检验信号的工作是否正确。

### 2. 整组联动试验方法

在整组联动试验前,应根据原理展开图和下面介绍的基本方法制定出相应的较具体的试验步骤。整组联动试验可参照下列基本方法进行:

(1) 试验前将各组件的罩壳打开,去除组件内为防运输振动的一些固紧措施,恢复组件的正常状态,按试验设备能供给的电流、电压值及各组件的可整定范围,整定好各组件的电流、电压值。

(2) 根据原理展开接线图,按安装单位分别在屏(台)的端子排上,加入组件动作所需要的交流电流和交流电压以及直流电压,分别检查各组件的动作顺序和信号指示是否正确,各指示测量仪表的读数是否符合要求。

(3) 再用短接或断开起动组件触点法(即模拟起动组件动作),以检验继电保护装置和自动装置的相互动作情况和顺序。

(4) 如电子设备有多重保护时,可按套分别进行。例如,三相主变压器设有差动保护、低压闭锁过电流保护、过负荷信号、瓦斯保护等;当试验差动保护装置时,可将其他保护装置连片断开,以使试验、检查清楚明确。

(5) 如果保护装置是按相分开设置的, 整组动作检验亦应按相进行。所有连线、压板、切换开关均应在它可能工作的位置上, 检查保护装置动作的正确性, 同时应注意检查是否有迂回回路存在。

(6) 对于屏(台)上安装的方向性组件、负序电流、电压组件, 可采用倒换所加电源的极性和相序的方法, 检验它们的特性(动作和不应动作)。

(7) 对继电保护及自动装置进行整组联动试验时, 应将屏(台)上直流电压降至 80%额定电压进行, 以模拟当直流母线电压降低时, 检验装置动作的正确性和可靠性。

(8) 对用通电动作顺序检查不到的个别电路或组件, 采用接通指示器及手动模拟动作情况检查连接的正确性。

(9) 试验完毕, 待发现的所有问题都处理完毕后, 对组件的可动部分加以固紧, 装上壳罩恢复原状。

### 17.3.3.3 绝缘性能检查试验

#### (1) 测量电气间隙和爬电距离

用钢板尺测量各导体间, 导体与裸露的不带电的导体间的电气间隙和爬电距离的数值是否符合要求, 一般采用抽查法, 采 5~10 个测量点着重检查导线或组件比较密集的地方。

#### (2) 测量二次回路对地的绝缘电阻

用 500V 的兆欧表测试, 测量时摇表转速不小于 120r/min, 连续摇测时间不小于 10s, 当指针稳定时开始读数, 整个二次回路对地(亦即对金属骨架)的绝缘电阻应不小于  $2M\Omega$ 。

#### (3) 耐压试验

控制屏(台)的各独立电路对地之间, 以及各独立电路之间, 应能承受 2kV 交流电压(有效值)历时 1min 的耐压试验而无击穿或闪络现象。试验前在端子排上找出各独立电路的相应端子, 对各独立电路之间及独立电路对地间分别施加规定的试验电压值。独立电路对地间的试验可以把各电路连接在一起, 共同对地进行试验。

试验时, 试验电压应从零突然加至 500V, 稍停后, 再突然升至规定的试验电压值, 保持 1min, 观察有无闪络和火花哼声, 然后尽量迅速平稳地下降至零。若发现某一电路出现闪络、火花及击穿现象, 应采取措施, 修理后重新进行耐压试验, 此时, 试验电压值不变。若对地试验, 不应再与其他电路连接在一起进行。

## 附录 A 电子设备防干扰技术相关缩写

- a.c.or AC——alternating current 交流电
- ACEC——advisory committee on electromagnetic compatibility 电磁兼容顾问委员会
- ADSL——asymmetric DSL 非对称数字用户环路
- AE——auxiliary equipment 辅助设备
- AF——audio frequency 音频
- AM——amplitude modulation 调幅
- AN——access network 接入网
- ANE——access network equipment 接入网设备
- CDMA——code division multiple access 码分多址
- CDN——coupling/decoupling network 耦合/去耦网络
- CIGRE——international conference on large HV electric systems 国际大电网会议
- CISPR——international special committee on radio interference 国际无线电干扰特别委员会
- CPE——customer premises equipment 用户驻地设备
- CRT——cathode ray tube 阴极射线管
- d.c.or DC——direct current 直流电
- dpf——dedicated power feed 专用供（馈）电
- DSL——digital subscriber loop 数字用户环路
- EFT/B——electrical fast transient /burst 电气快速瞬变/突发
- EIRP——equivalent isotropically radiated power 等效全向辐射功率
- EMC——electromagnetic compatibility 电磁兼容性
- Emf——electro-motive force 电动势
- EMF——electro-magnetic field 电磁场
- EPR——earth potential rise 地电位升高
- ERP——effective radiated power 有效辐射功率
- ESD——electrostatic discharge 静电放电
- EUT——equipment under 受试设备
- GDT——gas discharge tube 气体放电管
- GV——high voltage 高电压
- ICNIRP——international commission on non-ionizing radiation protection 国际非电离辐射  
保护委员会
- IEC——international electrotechnical commission 国际电工委员会
- ISDN——integrated services digital network 综合业务数字网

ISM——industrial, scientific and medical (equipment) 工业的, 科学的和医学的 (设备)  
ITE——information technology equipment 信息技术设备  
ITU-T——international telecommunication union-telecommunication standardization sector  
国际电信联盟电信标准局  
LCL——longitudinal conversion loss 纵向转换损耗  
LCTL——longitudinal conversion transfer loss 纵向转换传输损耗  
LE——local exchange 本地交换  
LEMP——lightning electromagnetic pulse 雷电电磁脉冲  
LI——line interface 线路接口  
LPS——lightning protection system 雷电保护系统  
LPZS——lightning protection zone 雷电保护区  
LT——line termination 线路终端  
MDF——main distribution frame 总配线架  
MOV——metal-oxide varistor 金属氧化压敏电阻  
n.a.——not applicable 不可用  
NT——network termination 网络终端  
OATS——open area test site 开阔试验场  
o/c——open circuit 开放电路  
pfv——power feeding voltage 供电电压  
PNI——public network interface 公用网接口  
PRBS——pseudo random bit sequence 伪随机比特序列  
PSTN——public switched telephone network 公用交换电话网  
PTC——positive temperature coefficient (resistor) 正温度系数  
RF——radio frequency 无线电频率  
RFI——radio frequency interference 射频接口  
RFT——remote feeding telecommunications circuit 远供通信电路  
RFT-G——remote feeding telecommunications circuit-current limited 远供通信电路—限电流  
RFT-V——remote feeding telecommunications circuit-voltage limited 远供通信电路—限电压  
RSE——remote switching equipment 远端交换设备  
SA——specific absorption 比吸收能  
SA——semi-conductor arrester 半导体避雷器  
SAA——semi-conductor arrester assembly 半导体避雷器组件  
SAR——specific absorption rate 吸收率  
SAP——specific absorption power 吸收功率  
SELV——safety extra low voltage 安全超低电压  
SLIC——subscriber line interface circuit 用户线路接口电路  
SPD——surge protective device 浪涌保护元件  
SPL——sound pressure level 声压级  
SSA——solid state arrester 固体避雷器  
TCE——telecommunication centre equipment 电信中心设备

TDMA——time division multiple access 时分多址

TN——trunk network 干线网

TNV——telecommunication network voltage 电信网电压

RSD——universal serial bus 通用串联总线

RPS——uninterruptible power supply 不间断电源

VDSL——very high speed DSL 调整用户数字环路

VDU——visual display unit 视频显示单元

UIC——international union of railway 国际铁路联盟

XDSL——digital subscriber loop x 数字用户环路

## 附录 B 场强的估算

### 1. 远区场场强估算

为了估算辐射体对环境的影响，对于典型的中波、短波、超短波发射台站的发射天线在环境中辐射场强按式（B-1）至式（B-6）计算。对正方形、圆口面微波天线在环境中辐射场功率密度按式（B-7）计算。

（1）中波（垂直极化波）

理论公式：

$$E = \frac{245}{r} \sqrt{P \cdot \eta \cdot G} \cdot F(h) \cdot F(\Delta \cdot \varphi) \cdot A \quad (\text{B-1})$$

近似公式：

$$E = \frac{300}{r} \sqrt{P \cdot G} \cdot A \quad (\text{B-2})$$

其中

$$A = 1.41 \frac{2 + 0.3X}{2 + X + 0.6X^2} \quad (\text{B-3})$$

$$X = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{(\varepsilon - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2}}{\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2} \quad (\text{B-4})$$

式中  $r$  为被测位置与发射天线中心的距离； $P$  为发射机标称功率； $\eta$  为天线效率； $G$  为相对于基本振子（点源天线  $G=1$ ）的天线增益； $F(h)$  为发射天线高度因子， $F(h)=1\sim 1.43$ ； $F(\Delta \cdot \varphi)$  为发射天线垂直（ $\Delta$  仰角）、水平面（方位角  $\varphi$ ）方向性函数； $A$  为地面衰减因子； $X$  为数量距离； $\lambda$  为波长； $\varepsilon$  为地球的介电常数； $\sigma$  为地球的电导率。

式（B-2）近似公式是由  $\eta \approx 1$ 、 $F(h) \approx 1.2$ 、 $F(\Delta \cdot \varphi) = 1$  得出的，即舒来依金-范德波尔公式。

（2）短波（水平极化波）

短波（水平极化波）场强计算公式同式（B-2）、式（B-3），但水平极化波的  $X$  按式（B-5）计算。公式中的符号意义同前。

$$X = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\varepsilon - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2}} \quad (\text{B-5})$$

（3）超短波（电视、调频）

$$E = \frac{444 \sqrt{P \cdot G}}{r} F(\theta) \quad (\text{B-6})$$

式中  $P$  为发射机标称功率； $G$  为相对于半波偶极子（ $G_{0.5\lambda}=1.64$ ）天线增益； $r$  为测量位置与天线中心的距离； $F(\theta)$  为天线垂直面方向性函数（视天线形式和层数而异）。

（4）微波

在距天线距离大于  $2D^2/\lambda$ （其中  $D$  为辐射体天线的最大孔径尺寸， $\lambda$  为相应频率的波长）的

远场区, 天线向外辐射的功率密度值  $S$  由下式计算

$$S = \frac{P \cdot G \cdot F(\phi, \theta)}{4\pi r^2} \quad (\text{B-7})$$

式中  $P$  为天线的发射功率;  $G$  为天线增益;  $F(\phi, \theta)$  为天线的方向性函数,  $\phi$ 、 $\theta$  是极坐标的仰角和水平角度;  $r$  为测量点距天线的距离。

式 (B-7) 是自由空间传输公式, 如果考虑到反射系数, 则式 (B-7) 还需乘上一个系数  $\gamma$ , 在 100% 反射情况下, (例如在一个全平面的良导体上反射) 电场强度  $E$  的值可以加倍, 而功率密度可以加 4 倍, 因此,  $\gamma$  的取值可以是 1~4, 一般为 2.56。所以有

$$S = \gamma \frac{P \cdot G \cdot F(\phi, \theta)}{4\pi r^2} \quad (\text{B-8})$$

如果给定离开天线的距离、发射功率和天线的增益函数, 则可以计算出远区场任何一点无阻挡地区的功率密度。

## 2. 近场区场强估算

对于近场区场强, 很难用理论公式计算, 最直接的方法是测量, 以下仅是对近场区场强的估算。

### (1) 蜂窝基站线性天线近场区场强估算

对于蜂窝基站的线性天线, 其近场区功率密度可以用一个圆柱体模型来描述, 在此模型中, 能量假设都均匀分布于一个和天线等高的圆柱体表面, 则功率密度为

$$S = \frac{8.08}{r} \left[ \frac{P}{160} \right] \quad (\text{B-9})$$

式中  $P$  为天线的输入功率;  $r$  为场点距天线的距离。

### (2) 口面天线近场区场强估算

$$S_{\max} = 4P_T / A \quad (\text{B-10})$$

式中  $S_{\max}$  为近场区场强最大值;  $4P_T$  为馈入天线的净功率;  $A$  为天线的实际几何面积。

上式中给出的预测值具有  $\pm 3\text{dB}$  的精度。

### (3) 扫描天线功率密度的修正

对于处于运动中的扫描天线, 功率密度可由下式估算

$$S_m = k_s S \quad (\text{B-11})$$

式中  $S_m$  为运动中天线的功率密度;  $k_s$  为天线旋转衰减因子;  $S$  为固定天线的功率密度。

远场区天线旋转衰减因子为

$$k_s = [3\text{dB (半功率) 波束宽度}] / \text{扫描角度} \quad (\text{B-12})$$

近场区天线旋转衰减因子为

$$k_s = L / d\phi \quad (\text{B-13})$$

式中  $L$  为扫描平面内天线尺寸;  $d\phi$  为给定距离上天线扫描扇区的圆周。

### (4) 复合场强

复合场强为两个或两个以上频率的电磁波复合在一起的场强, 其值为各单个频率场强平方和的根值, 可以用下式表示



$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \cdots + E_n^2} \quad (\text{B-14})$$

式中  $E$  为复合场强； $E_1$ 、 $E_2$ 、 $\cdots$ 、 $E_n$  为单个频率的场强值。

(5) 计量单位的换算

电场强度与功率密度在远区场中的换算公式为

$$S = \frac{E^2}{377} \quad (\text{B-15})$$

式中  $S$  为功率密度； $E$  为电场强度。

磁场强度与功率密度在远区场中的换算公式为

$$S = H^2 \times 377 \quad (\text{B-16})$$

式中  $S$  为功率密度； $H$  为磁场强度。

(6) 三方向测量取和公式

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (\text{B-17})$$

式中  $E$  为场强值； $E_x$  为  $x$  方向的场强值； $E_y$  为  $y$  方向的场强值； $E_z$  为  $z$  方向的场强值。

## 参 考 文 献

- [1] 吴懿平. 电子制造技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] (日) 菅沼克昭著. 宁晓山译. 无铅焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 朱大奇. 电子设备故障诊断原理与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [4] 王天曦, 李鸿儒. 电子技术工艺基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [5] 高攸纲. 电磁兼容总论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [6] 周旭. GTEM Cell 斧形块侧边曲线方程算法[J]. 中国工程科学, 2003.